

Untersuchung des Prägefoliendrucks im Hinblick auf die Anwendung im Elektronikbereich

Alexandra Lyashenko

Untersuchung des Prägefoliendrucks im Hinblick auf die Anwendung im Elektronikbereich

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von
Alexandra Lyashenko,
Ingenieurin in Fachrichtung „Technologie der polygrafischen Produktion“
aus Kamensk-Uralskij, Russische Föderation

Gutachter: 1. Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam
2. Prof. Dr.-Ing. Thilo Bein

Datum der Einreichung: 27. Januar 2014

Datum der mündlichen Prüfung: 6. Mai 2014

Darmstadt 2014

D 17

Alexandra Lyashenko

Untersuchung des Prägefoliendrucks im Hinblick auf die Anwendung im Elektronikbereich

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-39901

URI: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/3990>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints.

E-Publishing-Service der Technische Universität Darmstadt

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/>

Vorwort

Diese Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren an der Technischen Universität Darmstadt entstanden. Die Inhalte der Arbeit stammten aus meiner Beschäftigung für das LOEWE-Projekt AdRIA – Adaptronik-Research, Innovation, Application im Zeitraum vom 2010 bis 2014.

An erster Stelle gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam, der mir die Möglichkeit, im Drucktechnikbereich zu promovieren, gab. Herzlichen Dank für das Vertrauen, die Betreuung meiner Doktorarbeit und die Unterstützung meiner Persönlichkeits- und Karriereentwicklung.

Mein weiterer Dank ist an Herrn Prof. Dr.-Ing. Thilo Bein gerichtet, der während seiner Leitung des LOEWE-Projekts AdRIA meine Tätigkeit im Projekt unterstützte und die Rolle des Ko-Referenten meiner Arbeit übernahm.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Kollegen des Instituts für Druckmaschinen und Druckverfahren bedanken, von denen jeder seinen Beitrag zu meiner Weiterentwicklung leistete. Besonders dankbar bin ich meiner ehemaligen Kollegin und Freundin Larisa Salun für die fachliche und freundschaftliche Unterstützung während unserer gemeinsamen Tätigkeit im Projekt und unserer privaten Unternehmungen.

Mein weiterer Dank ist an Jann Neumann für die fachlichen Diskussionen und die Unterstützung beim Realisieren des messtechnischen Teils dieser Arbeit gerichtet. An dieser Stelle nicht zu unterschätzen ist die Hilfe von Aaron Oberthür, Daniel Maßfelder, Meliksah Ücüncü, Xenia Bachmann und Vinzenz Nienhaus – der studentischen Mitarbeitern, die mit voller Verantwortung und Motivation an die Aufgaben herangingen.

Für die fachliche Unterstützung möchte ich mich ebenfalls bei meinen Kollegen des Instituts für Produktionstechnik und Umformmaschinen; Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen; Instituts für Elektromechanische Konstruktionen; Instituts für Technische Thermodynamik und des Fraunhofer-Instituts für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit in Darmstadt bedanken.

Herzlichen Dank auch an alle Kollegen, die das Korrekturlesen meiner Arbeit übernahmen. Hier möchte ich mich besonders bei Herrn Manfred Jakobi bedanken, der die erste zeitaufwändige Korrektur übernahm.

Mein Dank geht ebenfalls an Nicole Schemel, Evgeny Kurmakaev, Ingmar Lissner, Stefan Griesheimer, Duy Linh Nguyen, Immadeddine Afara und Ardeshir Hakimi Tehrani für die freundschaftliche Unterstützung meiner Tätigkeit am Institut.

Meine Kollegen im Ausland vom Welsh Centre for Printing and Coating (Swansea, Wales, Großbritannien) und vom Centro de Fabricación Integrada (Las Palmas de Gran Canaria, Spanien) danke ich sehr für die Weiterentwicklung meiner interkulturellen Kompetenzen. Für die stundenlangen fachlichen Diskussionen bedanke ich mich besonders bei Davide Deganello. Danke ebenfalls an Anja und Simon Hamblyn, Christine Hammett und andere Swansea-Kollegen. Ben Clifford danke ich für die technische Rettung meines Laptops und damit meiner Dissertation. Rubén Paz Hernández, David Pestana Guillén, Alfonso Tamayo, Iván Rivero Alonso und Noelia Díaz danke ich für die Unterstützung meines Spanien-Aufenthalts.

Den Firmen LEONHARD KURZ Stiftung & Co. KG, Baier GmbH, HS Strambach Neuffer GmbH und dem Arbeitskreis Prägefoliendruck e. V. danke ich für die zur Verfügung gestellten Prägefolien, Maschinenzzeichnungen und weiteren technischen Informationen.

Ganz besonderen Dank von ganzen Herzen richte ich an meine Familie in Russland und an alle meine Freunde, die immer unerschütterlich an mich glauben und mir immer zur Seite stehen.

Ohne Euch wäre mein Weg anders!

Darmstadt, im Januar 2014

Alexandra Lyashenko

Kurzfassung

Die konventionellen Druckverfahren, wie Sieb-, Tief -, Flexodruck, und Inkjet sind für die Herstellung von funktionellen elektrischen Schichten sehr verbreitet. Mit diesen Verfahren ist es möglich, RFID-Antennen, OLEDs, Displays, Sensoren, Transistoren und andere elektronische Bauteile zu drucken.

Ein weiteres interessantes Verfahren zur Herstellung der elektronischen Bauteile ist der Prägefoliendruck. In der grafischen Industrie wird dieses Verfahren im Verpackungssektor oder für Sicherheitslösungen eingesetzt. Die hoch-vakuum aufgedampften Metallschichten der Prägefolie, oft aus Aluminium oder Gold, sind meistens sehr homogen. So besitzen sie gute elektrische Eigenschaften. Zusätzlich sind die Metallschichten sehr dünn und bereits mit einer Lackschicht geschützt. Flexibilität, Fertigungskosten und die anderen aufgezählten Vorteile zeigen die Eignung des Prägefoliendrucks für die Anwendung im Elektronikbereich.

Jedoch gibt es einige Probleme auf dem Weg zur Massenproduktion von elektronischen Bauteilen mittels des Prägefoliendrucks. Da der Prägefoliendruck derzeit vor allem für die Veredelung dekorativer Elemente in der grafischen Industrie verwendet wird, sind die Eigenschaften, wie Homogenität, Auflösung und Schichtdicke der geprägten Strukturen, nur in bestimmten Grenzen relevant und wurden somit bis jetzt nicht bewertet. Beim Drucken der hochwertigen elektronischen Bauteile sind diese Eigenschaften sehr wichtig, da die funktionellen Schichten zuverlässig, stabil sowie wiederholbar sein sollen.

Das Ziel dieser Arbeit ist, die Prozessgrenzen des Prägefoliendrucks für die Prägefoliendruckmaschinen und die Prozessmaterialien, die derzeit auf dem Markt verfügbar sind, zu definieren. Dazu wird erstmalig eine wissenschaftliche Analyse des Prägefoliendruckvorgangs durchgeführt. Aufgrund dessen werden die definierten Einflüsse auf die Prägeergebnisse untersucht und je nach ihrer Bedeutung im Prägefoliendruckprozess klassifiziert. So wird das Verfahren analysiert und für mögliche Anwendungen im Elektronikbereich beurteilt.

Des Weiteren wird untersucht, ob es möglich ist, die gefundenen Grenzen des konventionellen Verfahrens durch die Kombination des Prägefoliendrucks mit anderen Technologien zu erweitern. Damit wird die Möglichkeit geprüft, das Prägefoliendruckverfahren für noch mehr Anwendungen einsetzen zu können.

Abstract

The conventional printing processes such as screen, gravure, flexographic printing and also inkjet are very common for the application of functional electrical layers. Using them it is possible to print RFID antennas, OLEDs, displays, sensors, transistors and other electronic devices.

Another interesting method for manufacturing of electronic devices is hot stamping technology. It is used extensively in the graphics industry for packaging or security applications. The high-vacuum deposited metal layers of hot stamping foils, which are often aluminum or gold, are usually very homogenous. Thus they possess good electrical properties. Additionally, the metal layers are very thin and already protected with a varnish layer. Flexibility, manufacturing costs and the other advantages make hot stamping very suitable for the electronic industry.

However, there are some challenges to overcome in order to mass produce electrical devices using hot stamping. Since hot stamping technology is currently mainly used for finishing decorative elements in the graphics industry, properties such as homogeneity, resolution and thickness of the hot stamped layers are within certain limits relevant and were therefore not reviewed until now. For producing high quality electronic devices these properties are relevant, since the layers have to be functional, reliable and stable over time, as well as reproducible.

The aim of this research was to define the process boundaries of hot stamping for the machines and process materials that are currently available on the market. A scientific analysis of the hot stamping process was performed for the first time. The analytical factors influencing the results were reviewed and categorized depending on their significance on the hot stamping process. The existing technology was analyzed and assessed for possible applications in the field of electronics.

Furthermore, the possibility to spread the conventional method boundaries using a combination of hot stamping with other technologies was also investigated. Therefore, examining the possibility of being able to use the hot stamping for even more applications.

Реферат

Традиционные способы печати, такие как трафаретная, глубокая, флексографическая, а также струйная, широко используются для производства функциональных электрических слоев. С помощью данных методов можно выпускать антенны для радиочастотной идентификации (RFID), органические светодиоды, дисплеи, датчики, транзисторы и другие электронные компоненты.

Еще один интересный способ изготовления электронных компонентов – горячее тиснение фольгой. В полиграфии этот метод используется в упаковочной промышленности или в качестве средства защиты ценных бумаг. Слои металлов фольги горячего тиснения, в большинстве случаев из алюминия или золота, напыленные в вакууме, как правило, очень однородны. Следовательно, они обладают хорошими свойствами электрического проводника. Кроме того, слои металла очень тонкие и покрыты защитным слоем лака. Гибкость, производственные затраты и другие перечисленные преимущества доказывают пригодность способа горячего тиснения фольгой для использования его в области электроники.

Тем не менее, существуют некоторые проблемы на пути к массовому производству электронных компонентов при помощи этого способа. Поскольку данный метод в настоящее время используется в основном для отделки декоративных элементов в полиграфии, то такие свойства, как однородность, разрешение и толщина слоя напечатанных элементов, важны только в определенных границах. До настоящего момента они мало изучены. При печати высококачественных электронных компонентов эти свойства очень важны, так как функциональные слои должны быть надежными, стабильными и поддающимися воспроизведению.

Целью данной работы является определение технических границ способа горячего тиснения фольгой для машин и технологических материалов, доступных сегодня на рынке. Для достижения этой цели, впервые, был проведен научный анализ процесса горячего тиснения. В зависимости от полученных выводов, определенные факторы, влияющие на результаты печати, были изучены и классифицированы в соответствии с их значимостью.

Также была изучена возможность расширения определенных технических границ при комбинировании способа горячего тиснения фольгой с другими технологиями. Таким образом, была рассмотрена возможность использования процесса горячего тиснения для еще большего количества компонентов.

Abstracto

Los métodos de impresión convencionales como la serigrafía, el huecograbado, la flexografía, y el inkjet son muy utilizados para la producción de capas funcionales eléctricas. Con estos métodos, es posible imprimir antenas RFID, OLED, displays, sensores, transistores y otros componentes electrónicos.

Otro método interesante de fabricación de los componentes electrónicos es la estampación en caliente. En la industria gráfica, este método se utiliza en el sector del embalaje o de soluciones de seguridad. Las capas metálicas depositadas por alto vacío, a menudo de oro o de aluminio, son, por lo general, muy homogéneas. En consecuencia, tienen buenas propiedades eléctricas. Además, las capas de metal son muy finas y ya están protegidas con una capa de barniz. Flexibilidad, los costes de fabricación y otras ventajas muestran la aptitud de la estampación en caliente para usarla en el área de la electrónica.

Sin embargo, hay algunos problemas para el desarrollo de la producción en masa de componentes electrónicos a través de la estampación en caliente. Debido a que la estampación en caliente se utiliza en la actualidad para el ennoblecimiento de elementos decorativos en la industria gráfica, propiedades tales como la homogeneidad, la resolución y el espesor de la capa de las estructuras impresas son relevantes sólo hasta cierto punto y, por lo tanto, no han sido investigadas hasta ahora. Cuando se imprimen componentes electrónicos de alta calidad, estas propiedades son muy importantes debido a que las capas funcionales deben ser confianza, estables y repetibles.

El objetivo de este trabajo es definir los límites del proceso de estampación en caliente para las máquinas y los materiales del proceso que se encuentran disponibles en el mercado actual. Con dicho fin, se realiza, por primera vez, un análisis científico del proceso de estampación en caliente. Para ello, se analizan los factores definidos del proceso y, dependiendo de los resultados de estampación en caliente, se clasifican según su importancia. De este modo, se analiza el método y se juzga qué posibles aplicaciones en el sector de la electrónica.

Así mismo, también se investiga si sería posible extender los límites del método convencional a través de la combinación de estampación en caliente con otras tecnologías. Con este objetivo, se contempla la posibilidad de utilizar el proceso de estampación en caliente para más aplicaciones.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Kurzfassung	V
Abstract	VII
Резюме	IX
Abstracto	XI
Inhaltsverzeichnis.....	XIII
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis.....	XVII
1. Einführung und Motivation	1
2. Ausgangssituation und Ziel der Arbeit	3
2.1 Stand der Technik.....	3
2.1.1 Prägefoliendruck	3
2.1.2 Verfahrensvarianten des Prägefoliendrucks.....	6
2.1.3 Prozessparameter.....	8
2.1.4 Prägefoliendruckmaschinen	9
2.1.5 Prägefolien	12
2.1.6 Prägewerkzeuge	14
2.1.7 Patrizen und Prägeunterlagen.....	15
2.1.8 Substrate	16
2.1.9 Anwendung des Prägefoliendrucks im Elektronikbereich	16
2.2 Prägefoliendruckmaschine GEBA 6	17
2.2.1 Prägeeinheit.....	19
2.2.2 Prägefolienvorschubapparat	20
2.2.3 Erzeugung und Regelung der Prägetemperatur.....	21
2.2.4 Erzeugung und Regelung des Anpressdrucks	21
2.2.5 Steuerung der Zeitabschnitte	22
2.2.6 Ablauf des Prägefoliendrucks	23

2.3	Stand der Wissenschaft	24
2.4	Zielsetzung und Vorgehensweise	25
3.	Analyse des Prägefoliendruckvorgangs	26
3.1	Beschreibung des Prozesses und Definition der Prozessgrenze.....	26
3.2	Definition der Systemgrenze	29
3.3	Definition der Systemparameter.....	30
3.3.1	Eingangsparameter	30
3.3.2	Ausgangsparameter	36
3.3.3	Störfaktoren	38
3.4	Zusammenfassung	39
4.	Untersuchung der Eingangsparameter: Prozessmaterial	40
4.1	Festlegung der Eingangsparameter	40
4.2	Prägewerkzeuge	42
4.2.1	Auswahl und Layout	42
4.2.2	Mikroskopische Untersuchung.....	44
4.2.3	Linienstärken der gravierten Prägestrukturen	47
4.2.4	Kennlinie zur Kompensation der Linienstärkenzunahme bei Prägewerkzeugen...	49
4.2.5	Zusammenfassung.....	50
4.3	Prägefolien	51
4.3.1	Auswahl.....	51
4.3.2	Untersuchung der Schichten.....	55
4.3.3	Zusammenfassung.....	57
4.4	Substrat.....	57
4.5	Prägeunterlage	58
4.6	Zusammenfassung	59
5.	Untersuchung der Eingangsparameter: Prozessparameter	61
5.1	Festlegung der Eingangsparameter	61
5.2	Prägetemperatur	63
5.2.1	Temperatur in der Prägeeinheit während des Aufheizens der Prägewerkzeuge	63
5.2.2	Temperatur in der Prägeeinheit und der Prägeunterlage während eines Prägefoliendruckvorgangs.....	72

5.2.3	Schlussfolgerungen	85
5.2.4	Kennlinie zur Kompensation der Prägetemperatur	86
5.3	Anpressdruck.....	87
5.3.1	Messungen.....	87
5.3.2	Ergebnisse	88
5.3.3	Diskussion und Zusammenfassung	89
5.4	Zusammenfassung	90
6.	Untersuchung der Ausgangsparameter	91
6.1	Festlegung der Ausgangsparameter	91
6.2	Ablauf der Experimente	92
6.3	Homogenität und Kantenrauheit der geprägten Strukturen.....	94
6.4	Schichtdicke und Oberflächenrauheit der geprägten Strukturen.....	98
6.5	Strukturgröße: Linienstärke.....	101
6.5.1	Messungen und Auswertung	102
6.5.2	Variierung der Soll-Temperatur	105
6.5.3	Variierung der Prägezeit.....	112
6.5.4	Variierung des Anpressdrucks	115
6.5.5	Zusammenfassung	118
6.6	Restliches Prozessmaterial	119
6.6.1	Prägewerkzeuge	119
6.6.2	Prägeunterlage	120
6.7	Schlussfolgerungen	122
6.7.1	Quantitativer Zusammenhang der Eingangs- und Ausgangsparameter	122
6.7.2	Kennlinie zur Kompensation der Linienstärkenzunahme im Prägefoliendruck	123
6.7.3	Qualitativer Zusammenhang der Eingangs- und Ausgangsparameter	124
6.8	Zusammenfassung	125
7.	Empfehlungen und Praxisbeispiele.....	127
7.1	Erkenntnisse für die Anwendung des Prägefoliendrucks im Elektronikbereich....	127
7.1.1	Prägewerkzeuge	127
7.1.2	Prägefolien	129
7.1.3	Substrate	130

7.1.4	Prägeunterlagen	130
7.1.5	Prägetemperatur	131
7.1.6	Prägezeit	131
7.1.7	Anpressdruck.....	132
7.1.8	Prägegüter.....	132
7.2	Sensorstrukturen.....	133
7.3	Methode zur Kontaktierung gedruckter Schichten.....	136
8.	Zusammenfassung und Ausblick	140
	Literaturverzeichnis.....	143
	Produktinformationen	150
	Eigene Veröffentlichungen	152
	Anhang 1. Zeichnung der Heizblöcke	153
	Anhang 2. Spezifikation der Heizpatronen.....	155
	Anhang 3. Messwerte der Linienstärken auf den Prägewerkzeugen	156
	Anhang 4. Spezifikation der PET-Folie.....	158
	Anhang 5. Spezifikation der Thermoelemente	159
	Anhang 6. Zeichnungen zusätzlicher Teile beim Temperaturmessaufbau.....	160
	Anhang 7. Skizze der Funktionsweise des LabVIEW-Programms	163
	Anhang 8. Temperaturmessungen beim Temperaturmessaufbau „Aufheizen“	164
	Anhang 9A. Temperaturmessungen beim Temperaturmessaufbau „Prägefoliendruckvorgang“ für die Prägefolie Luxor GTS Premium 355.....	167
	Anhang 9B. Temperaturmessungen beim Temperaturmessaufbau „Prägefoliendruckvorgang“ für die Prägefolie HS 19-3.....	171
	Anhang 10. Simulation der Prägetemperatur auf Prägewerkzeugoberflächen	175
	A10.1 ANSYS-Simulation	175
	A10.2 Zusammenfassung	192
	Anhang 11A. Linienstärkenzunahme: Prägefolie Luxor GTS Premium 355, Messingprägewerkzeug.....	194
	Anhang 11B. Linienstärkenzunahme: Prägefolie Luxor GTS Premium 355, Stahlprägewerkzeug.....	195
	Anhang 11C. Linienstärkenzunahme: Prägefolie HS 19-3, Messingprägewerkzeug	196
	Anhang 11D. Linienstärkenzunahme: Prägefolie HS 19-3, Stahlprägewerkzeug	197

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Größen – lateinische Symbole

Symbol	Bedeutung	Wert	Einheit
A	Fläche		m^2
A4	DIN-Format	210×297	mm
A5	DIN-Format	148×210	mm
B	Breite		m
c	Spezifische Wärmekapazität		kJ/kgK
C	Strahlungsaustauschzahl		$\text{W/m}^2\text{K}^4$
D	Durchmesser		mm
e	Eulersche Zahl	2,718	
f	Funktion		
F	Kraft		N
g	Fallbeschleunigung	9,81	m/s^2
Gr	Grashof-Zahl		
K	Länge		m
l	Anströmlänge		m
L	Linienstärke		μm
m	Milli	10^{-3}	
Nu	Nusselt-Zahl		
Pr	Prandtl-Zahl		
\dot{Q}	Wärmemenge		W
Ra	Rayleigh-Zahl		
R_a	Mittlere arithmetische Rauheit		μm
R^2	Bestimmtheitsmaß		
T	Temperatur in Celsius		$^{\circ}\text{C}$
t	Zeit		s
x, y, z	Ortskoordinaten		

Z	Linienstärkenzunahme		%
\bar{Z}	Mittlere Liniensträrkenzunahme		%

Größen – griechische Symbole

Symbol	Bedeutung	Wert	Einheit
α	Wärmeübergangskoeffizient		$\text{W/m}^2\text{K}$
β	Wärmeausdehnungskoeffizient		K^{-1}
ε	Emissionsgrad		
k	Kilo	10^3	
λ	Wärmeleitfähigkeit		W/mK
μ	Mikro	10^{-6}	
M	Mega	10^6	
ν	Kinematische Viskosität		m^2/s
ρ	Dichte		kg/m^3
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	$5,67 \cdot 10^{-8}$	$\text{W/m}^2\text{K}^4$
σ_D	Disperser Anteil der Oberflächenspannung		mN/m
σ_p	Polarer Anteil der Oberflächenspannung		mN/m
ϑ	Temperatur in Kelvin		K
φ	Winkel		°
Ω	Elektrischer Widerstand		Ohm
Ω/\square	Elektrischer Flächenwiderstand		Ohm/\square
\square	Quadratische Schicht		

Indizes

Index	Bedeutung
$a, b, c,$ d, e, f	Bezeichnung der Bestandteile in der Prägeeinheit
ab	Abziehen
<i>Echtzeit</i>	Aktuelle Zeit
<i>max</i>	Maximum
<i>Pr</i>	Präge-
<i>pl</i>	Prägelinie
<i>pw</i>	Prägewerkzeug

<i>Referenz</i>	Referenz-Thermometer
<i>Soll</i>	Soll-Wert
<i>s</i>	Strahlung
∞	Umgebung

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
3D	Dreidimensional oder drei Dimensionen
ASTM	American Society for Testing and Materials (deutsch: amerikanische Standardisierungsorganisation)
CAD	Computer-aided design (deutsch: rechnerunterstütztes Konstruieren)
CNC	Computerized Numerical Control (deutsch: computergestützte numerische Steuerung)
Cr	Chrom
DIN	Deutsches Institut für Normung
FE	Finite-Element
FEM	Finite-Element-Method (deutsch: Methode der finiten Elemente)
IDD	Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren
ISO	International Organization for Standardization (deutsch: Internationale Organisation für Normung)
KÜH	Kabelübergangshülse
MID	Molded Interconnect Devices (deutsch: Spritzgegossener Schaltungsträger)
Ni	Nickel
Nr.	Nummer
PC	Personal Computer (deutsch: persönlicher Rechner)
OLED	Organic Light Emitting Diode (deutsch: organische Leuchtdiode)
PET	Polyethylenterephthalat
REM	Rasterelektronenmikroskop
RFID	Radio-frequency identification (deutsch: Identifizierung mit Hilfe elektromagnetischer Wellen)
TDMS	Dateiformat der Firma National Instruments
TE	Thermoelement
THL	Thermoleitung

1. Einführung und Motivation

Seit einigen Jahren arbeiten mehrere Forschungsinstitute, Einrichtungen und Unternehmen an der Realisierung elektronischer Bauteile mittels verschiedener Verfahren, die zur kostengünstigen, vereinfachten und flexiblen Produktion von derartigen Produkten führen können [OEA13]. Unter anderen kostengünstigen Technologien, wie Beschichten und Aufdampfen, steht das Drucken im Fokus der Forschungsarbeit.

Das Drucken als Verfahren existiert schon seit Jahrhunderten und wurde von Johannes Gutenberg für die schnelle Herstellung von mehreren Exemplaren der ersten Bücher erfunden [GER73, KAP86, VEN00]. Zurzeit wird das Verfahren in unterschiedlichen Bereichen unseres Lebens eingesetzt und hat eine Vielzahl von Anwendungen gefunden: Vom Drucken klassischer Bücher, Prospekte und Verpackungen bis zum Bedrucken und Beschriften von vielen weiteren Materialien. Der Prozess entwickelt sich über die Jahre weiter, das Prinzip bleibt allerdings gleich. Momentan existieren mehrere Verfahren und Arten des Druckens. Hauptsächlich werden Flachdruck, Tiefdruck, Hochdruck und Siebdruck unterschieden. Diese werden als konventionelle Druckverfahren bezeichnet. Außer diesen konventionellen Druckverfahren gibt es seit einiger Zeit die digitalen Verfahren, die mit dem ursprünglichen Buchdruck kaum zu vergleichen sind: Inkjet, Thermografie usw. [KIP00].

Erste Versuche zur Herstellung elektronischer Bauteile durch das Drucken fanden schon Anfang des 20. Jahrhunderts statt. Hauptsächlich kam damals das Siebdruckverfahren zum Einsatz, womit erste Leiterplatten gedruckt worden sind [INT13]. Die Tatsache, dass dies möglich ist, war auch der erste Anstoß, welcher eine breite Forschung auf dem Gebiet veranlasste.

Momentan gibt es schon einige Forschungsberichte und Ergebnisse, die deutlich zeigen, dass das Drucken auch im relativ neuen Anwendungsbereich, Elektronik, großes Potenzial hat. Versuche, die Drucktechnologie beherrschbar und somit für die Massenproduktion zugänglich zu machen, sind jedoch vereinzelt und nicht wirklich erfolgreich [VDI13]. Es liegt daran, dass beim konventionellen Drucken Qualitätsschwankungen gedruckter Schichten nur dann relevant sind, wenn sie vom menschlichen Auge wahrgenommen werden können. Bei der druckbaren Elektronik (Begriffsdefinition nach Willmann [WIL12]) stellen Schichtdickengleichförmigkeit und -kontinuität dagegen wesentliche Qualitätsmerkmale für die Funktion der gedruckten Bauteile dar [FUE06]. Die gedruckten funktionalen Bauteile zeichnen sich durch die gleichmäßigen hochaufgelösten Schichten im μm - und teilweise auch im nm -Bereich aus. Die großen Herausforderungen hier sind die Wiederholbarkeit und die Zuverlässigkeit der gedruckten funktionalen Schichten. Eine weitere Herausforderung liegt in

der Strukturauflösung. Die Strukturstärken unterhalb von 20 µm können in herkömmlichen Druckverfahren nur schwer hergestellt werden [BLA05, LYA12a]. Im Gebiet der druckbaren Elektronik werden hauptsächlich der Inkjet und Siebdruck sowie der Tief- und Flexodruck eingesetzt [BLA05]. Es werden bereits erfolgreich Sensoren mit dem Siebdruckverfahren [RAU11a, RAU11b, RAU12], erste OLEDs mit Inkjet [BHA98] und andere funktionale Elemente hergestellt [KO07, MAI10, MOE09, SOM09].

Ein anderes interessantes Druckverfahren, welches zurzeit kaum für den Einsatz bei der Herstellung von Elektronik diskutiert wird, ist der Prägefoliendruck oder, wie er auch anders genannt wird, das Heißprägen.

Der Prägefoliendruck wird konventionell für die Veredelung verschiedener Druckprodukte verwendet. Für die Verleihung eines echten Metalleffekts beim grafischen Drucken werden sogenannte Prägefolien eingesetzt, die in den meisten Fällen eine Aluminiumschicht haben [KUR12]. Das Metall wird mit hohen Anforderungen auf den Folienträger aufgedampft, so dass die Metallpartikel dicht beieinander liegen und so eine dünne homogene Leiterschicht im nm-Bereich aufbauen.

Der Umstand, dass die Prägefolien eine Metallschicht besitzen, führte zur Idee, dieses Verfahren für elektronische Anwendungen einzusetzen. Wenige einzelne Produkte in diesem Bereich sind von den jeweiligen Firmen patentiert und sind nur in speziellen Anwendungsgebieten ohne wissenschaftlich erforschte Grundlagen verbreitet.

Obwohl heutige Prägefoliendruckmaschinen über eine moderne Ausstattung mit hohem Automatisierungsgrad verfügen, gehört der Prägefoliendruck immer noch zum Kunsthandwerk. Das Ergebnis der Arbeit ist stark von der Erfahrung und dem Talent des Personals abhängig. Die Erfahrungen mit einzelnen Prägefolien und Substraten werden in Betrieben mühevoll gesammelt und an Nachfolger weitergegeben. Die Erzeugung guter Prägegüter ist stark von verschiedenen Prozessparametern abhängig.

Der Qualitätsstandard der durch den Prägefoliendruck realisierten grafischen Produkte wird meistens nur visuell überprüft und hat einen großen Spielraum. Anders sieht es für die Anwendungen im Elektronikbereich aus. Hier liegen ganz andere Anforderungen vor: Die Qualität der Bauteile muss auf höherem Niveau bleiben, um die Funktionsfähigkeit der elektronischen Produkte und eine gute Wiederholbarkeit des Herstellungsprozesses zu ermöglichen. Außerdem hat der Minimalisierungsgrad der Bauteile die höchste Relevanz.

Elektronische Bauteile sind ein noch relativ neues Feld für den Prägefoliendruck. Bestehende Erfahrungen im Bereich sind internes Know-how der Unternehmen und einzelner Anwendungen. Da für den Prägefoliendruck noch keine grundlegenden Untersuchungen der Einflussparameter, ihrer Zusammenhänge untereinander und vor allem ihrer Auswirkungen auf die Prägeergebnisse durchgeführt worden sind, ist es an dieser Stelle von Interesse, sowohl den Prägefoliendruck als Prozess als auch möglichst viele seiner Parameter zu untersuchen, um eine Aussage über die Wichtigkeit jeweiliger Parameter und ihren Einfluss beim Herstellen vor allem elektronischer Bauteile zu treffen.

2. Ausgangssituation und Ziel der Arbeit

In diesem Kapitel wird das Prägefoliendruckverfahren vorgestellt: Von seinem Arbeitsprinzip, den Anwendungsfeldern bis hin zur Auswahl der Prozessmaterialien.

Gleich am Anfang der Arbeit werden die Grundbegriffe des Prägefoliendrucks eingeführt, die in der Literatur und im Gebrauch bis jetzt nicht eindeutig festgelegt worden sind.

In Abschnitten werden Verfahrensvarianten, Prägefoliendruckmaschinentypen und Prozessparameter, die an derartigen Druckmaschinen einstellbar sind und einen wichtigen Einfluss auf die Prägefoliendruckergebnisse haben, erläutert. Danach wird der Stand der Technik zur Herstellung der wichtigsten Prozessmaterialien, wie Prägewerkzeuge, Patrizen und Prägefolien, beschrieben. Außer den Anwendungen des Verfahrens innerhalb der grafischen Industrie werden Produktbeispiele aus dem Elektronikbereich vorgestellt.

Im weiteren Verlauf wird die Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 mit ihren technischen Daten beschrieben. Dazu werden die Informationen über den Aufbau, die Erzeugung und die Regelung einiger Prozessparameter und den Ablauf des Prägefoliendrucks an der GEBA 6 erläutert.

Ergänzend wird ein Überblick über den Stand der Wissenschaft zu diesem Verfahren gegeben. Am Ende des Kapitels wird das Ziel dieser Arbeit definiert und die ausgewählte Vorgehensweise beschrieben.

2.1 Stand der Technik

2.1.1 Prägefoliendruck

Der Prägefoliendruck [ARB84] wird in der grafischen Industrie vor allem als Druckveredelungsverfahren verstanden [ARB05]. Ein Beispiel für die Anwendung des Verfahrens ist die Veredelung von Details auf Offsetdruckbogen in der Verpackungsindustrie (siehe Abb. 2.1) [ARB05].

Neben einem großen Spektrum von Anwendungen im Verpackungssektor, wird der Prägefoliendruck im Werbebereich eingesetzt: Exklusive Briefbogen, Geschäftskarten, Prospekte und Plakate. Im Verlagssektor werden am häufigsten Glückwunschkarten und Kalender sowie Einbände und Schutzumschläge für Bücher veredelt [ARB05].



Abb. 2.1: Ein durch den Prägefoliendruck realisiertes Druckprodukt. Die Schrift und die Dekorationsdetails auf dem Etikett sind im Prägefoliendruck gefertigt. Bildquelle: [KOL13].

Im Sektor des Sicherheitsdrucks wird das Verfahren bei der Herstellung von Geldscheinen, Identitätskarten, Zertifikaten und Zeugnissen aller Art zum Produktschutz eingesetzt. Hier kommen am häufigsten sondergefertigte Prägefolien, beispielsweise mit Vario- oder Hologrammen, zur Anwendung [ARB05].

Da der Prägefoliendruck auch auf nichtsaugfähigen Bedruckstoffen möglich ist, wird er in fast allen Bereichen bei der Gestaltung und Herstellung industrieller Erzeugnisse eingesetzt. Dazu werden die Kunststoffindustrie, Automobilindustrie, Unterhaltungselektronik und der Telekommunikationsbereich gezählt. Außerdem ist der Prägefoliendruck für Schreib- und Zeichengeräte ebenso wie bei der Produktion von Elektrogeräten und im Haushaltswarenssektor einsetzbar. Hier kann die Anwendung vom exakten Skalenaufdruck auf Messgeräten, über die dekorative Gestaltung bis hin zur großflächigen Bedruckung reichen. Weitere Anwendungsfelder sind die Schuh-, Leder- und Möbelindustrie [ARB05].

Aus Sicht der Klassifizierung der Druckverfahren kann der Prozess als eine Art des direkten Hochdruckverfahrens, genauer als ein trockenes Hochdruckverfahren definiert werden. Das Prozessprinzip weist typische Merkmale eines Hochdrucks auf [KIP00], allerdings mit einer Besonderheit: Statt flüssiger Druckfarben werden die „trockenen“ Prägefolien eingesetzt. Während des Prägefoliendruckvorgangs treten die erhabenen bzw. freigestellten Flächen des Prägewerkzeuges mit der Prägefolie in Kontakt. An diesen Stellen lösen sich die Transferschichten vom Folienträger und werden gleichzeitig durch die Hitze des Prägewerkzeuges und einen definierten Anpressdruck mit der Haftschrift auf dem Substrat fixiert. Im letzten Schritt wird der Folienträger vom Substrat abgezogen (Abb. 2.2) [VDI95, KUE90].

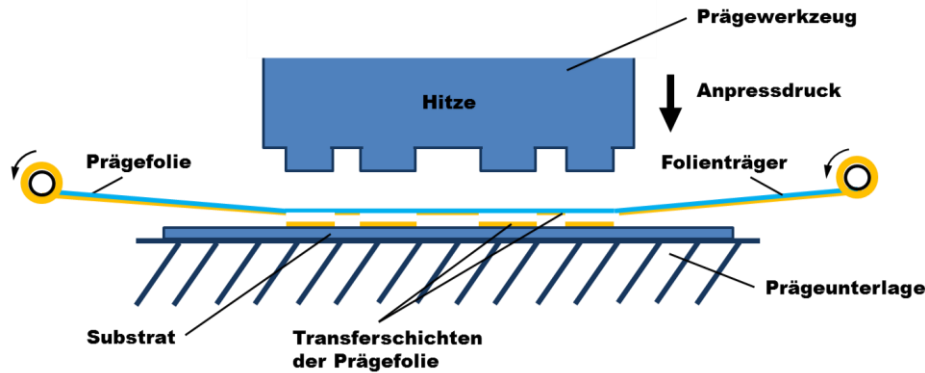


Abb. 2.2: Skizze des Prägefoliendrucks. Die Transferschichten der Prägefolie werden durch die Hitze des Prägewerkzeuges und den Anpressdruck auf das Substrat übertragen. Im weiteren Schritt wird der Folienträger vom Substrat abgezogen. Das Prägewerkzeug ist einer Hochdruckform ähnlich.

Speziell beim Prägefoliendruck wird die Druckform oft „Prägewerkzeug“ genannt [ARB05, ARB84]. Dieser Begriff wird für die Bezeichnung der Druckform beim Verfahren im weiteren Verlauf der Arbeit benutzt. Ebenfalls werden an dieser Stelle weitere Begriffe des Prägefoliendrucks, welche in dieser Arbeit verwendet werden und in Tabelle 2.1 aufgeführt sind, eingeführt.

Tabelle 2.1: Begriffsdefinition bei den konventionellen Druckverfahren und dem Prägefoliendruck.

<i>Begriff bei den konventionellen Druckverfahren [KIP00]</i>	<i>Begriff beim Prägefoliendruck [ARB84]</i>
Druckverfahren	Prägefoliendruckverfahren
Druckvorgang/-prozess	Prägefoliendruckvorgang/-prozess
Druckmaschine	Prägefoliendruckmaschine
Druckform	Prägewerkzeug
Gegendruckform	Patrize
Druckfarbe	Prägefolie
Druckunterlage/Aufzug	Prägeunterlage
Druckgut/Druckergebnis	Prägegut/Prägeergebnis
drucken (Verb)	prägen (Verb)

Das Vorwort „Präge-“ kommt aus der Praxis, in der unter Fachleuten das Verfahren oft „Prägen“, „Heißprägen“, „Folienheißprägen“ usw. genannt wird, und wird deshalb für einige Verfahrensbegriffe übernommen [ARB05, ARB84]. Besonders oft ist die Bezeichnung „Heißprägen“ und die Auseinandersetzung bei den weiteren Verfahrensbegriffen außerhalb der grafischen Industrie [BOL13, KOL12] zu treffen. Die neue Norm ISO 472:2013 übernimmt ebenfalls trotz der Begriffsdefinition des Arbeitskreises Prägefoliendruck e.V. in [ARB05] das Wort „Heißprägen“ für die Prozessbezeichnung [ISO13a].

In englischer Sprache werden für das Verfahren oft zwei Begriffe benutzt: „hot stamping“ und „hot embossing“ [GER72]. Nach der Norm ISO 12637-4:2008 wird sogar ein weiterer Begriff „foil stamping“ für den temperaturegebundenen Transfer von farbigen Prägefolien oder Blattgold eingeführt [ISO13b].

Obwohl mit „hot embossing“ eher der Vorgang zum Strukturieren/Verformen von Kunststoffen ohne zusätzliche Prägefolie bezeichnet wird [BEC00, WOR09, WU11], wird dieser Begriff auch für den grafischen Druckprozess benutzt und oft mit dem Prägefoliendruck verwechselt.

In der Norm ISO 472:2013 wird der Prägefoliendruck als „hot stamping“ bezeichnet [ISO13c]. Für diese Arbeit wird der Begriff „hot stamping“ gemäß der ISO-Norm 472:2013 in englischer Sprache angenommen.

2.1.2 Verfahrensvarianten des Prägefoliendrucks

Es werden verschiedene Varianten des Prägefoliendrucks unterschieden. Nach Arbeitskreis Prägefoliendruck e.V. [ARB05] werden die Prägefoliendruck-Varianten „Plan“, „Struktur“ und „Relief“ in Abhängigkeit von der Gestaltung des Prägewerkzeuges und der daraus resultierenden Oberflächengestalt des Prägeergebnisses unterschieden.

„Plan“ ist die am meisten verbreitete Art des Prägefoliendrucks. Hier wird der Schwerpunkt auf rein visuelle Effekte der Prägefolien gelegt. Beim Betrachten des Prägeergebnisses scheinen die Transferschichten in einer Ebene mit dem Substrat zu liegen, ist aber immer minimal vertieft, was mit dem menschlichen Auge nicht oder nur sehr schwer bemerkt werden kann. Das Prägewerkzeug gleicht hier einer typischen Hochdruckform (Abb. 2.3).

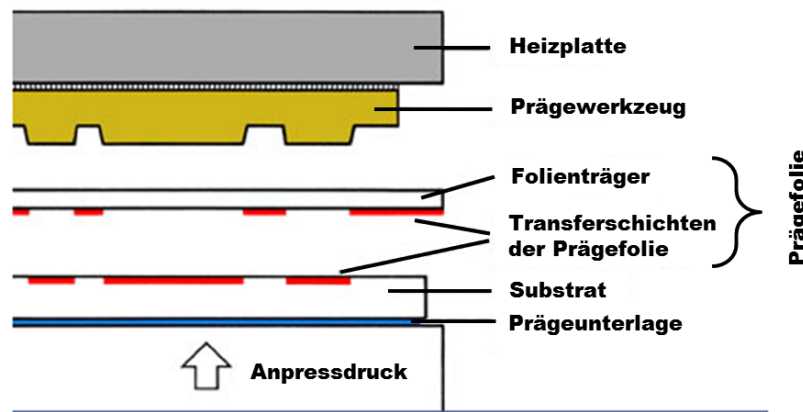


Abb. 2.3: Skizze der Prägefoliendruck-Variante „Plan“. Die Transferschichten der Prägefolie werden durch die Hitze des Prägewerkzeuges und den Anpressdruck auf das Substrat übertragen. Das Prägewerkzeug ist einer Hochdruckform ähnlich. Mit dem bloßen Auge betrachtet, scheinen die übertragenen Transferschichten in einer Ebene mit dem Substrat zu liegen. Bildquelle: [ARB05].

Der Prägefoliendruck „Struktur“ ist eine Variante, bei der das Prägeergebnis mit einer Oberflächenstruktur versehen wird (Abb. 2.4). Das Prägewerkzeug ist hier auch einer Hochdruckform ähnlich, deren Oberfläche allerdings mit einer starken Struktur versehen ist. In Abhängigkeit von dieser Struktur wird das Substrat dreidimensional verformt. Beim Prägefoliendruck „Struktur“ wird eine sogenannte Patrize als Gegendruckform verwendet.

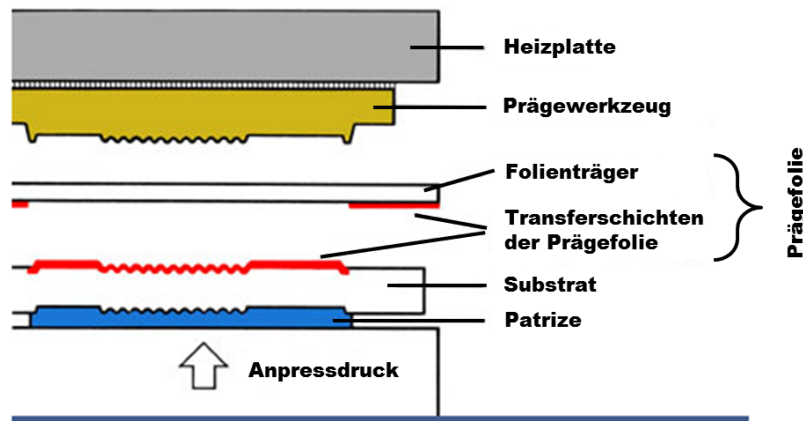


Abb. 2.4: Skizze der Prägefoliendruck-Variante „Struktur“. Die Transferschichten der Prägefolie werden durch die Hitze des Prägewerkzeuges und den Anpressdruck auf das Substrat übertragen. Das Prägewerkzeug ist einer Hochdruckform ähnlich und mit einer Struktur auf der Oberfläche versehen. Die Patrize bildet hier eine Gegendruckform. Das Substrat ist nach dem Prägefoliendruckvorgang dreidimensional umgeformt. Bildquelle: [ARB05].

Bei der Variante „Relief“ werden die optisch wirksamen Schichten der Prägefolie und der Bedruckstoff entsprechend der Oberflächengestalt eines Reliefprägewerkzeuges dreidimensional umgeformt, ohne eine zusätzliche Struktur auf der Oberfläche der geprägten Schichten, wie es bei der „Struktur“-Variante der Fall ist, zu erzeugen (Abb. 2.5). Eine Patrize bildet auch hier die Gegendruckform [ARB05].

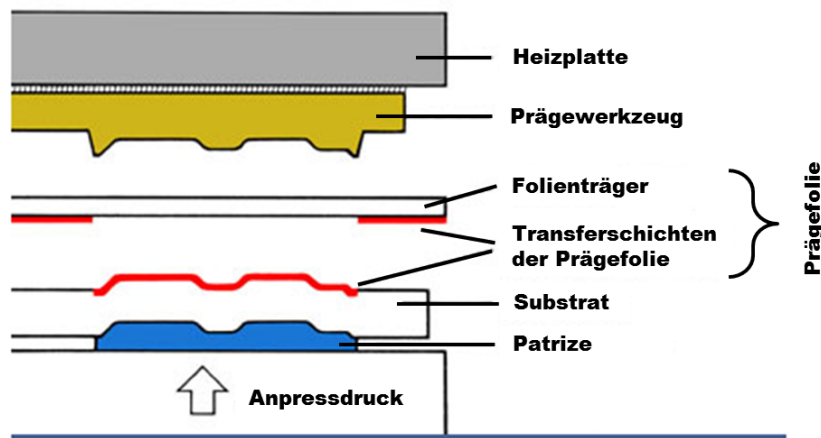


Abb. 2.5: Skizze der Prägefoliendruck-Variante „Relief“. Die Transferschichten der Prägefolie werden durch die Hitze des Prägewerkzeuges und den Anpressdruck auf das Substrat übertragen. Das Prägewerkzeug ist einer Hochdruckform ähnlich. Die Patrize bildet damit eine Gegendruckform. Das Substrat ist nach dem Prägefoliendruckvorgang dreidimensional umgeformt. Bildquelle: [ARB05].

Obwohl der Prägefoliendruck „Plan“ als ein ausgeprägtes Hochdruckverfahren klassifiziert wird, werden die Relief- und Strukturtechniken des Prägefoliendruckes oft den anderen Prägeverfahren (Definition der Prägeverfahren nach Arbeitskreis Prägefoliendruck e.V. [ARB05]) zugeordnet [ARB84].

Bei der Prägewerkzeuggestaltung vom „Relief“-Prägefoliendruck werden einstufige und mehrstufige Reliefformen unterschieden. Es handelt sich um eine „embossing“-Prägung, wenn das Relief in erhabener Ausführung angefertigt ist. Die Kombination dieser Variante mit der am feinsten aufgelösten „Struktur“-Variante hat inzwischen eine eigene Bezeichnung

bekommen und wird unter dem englischen Begriff „Microembossing“ auch in deutscher Sprache verstanden (Abb. 2.6) [ARB12]. Wenn das Relief in vertiefter Ausführung graviert ist, wird es „debossing“ genannt [ARB05].

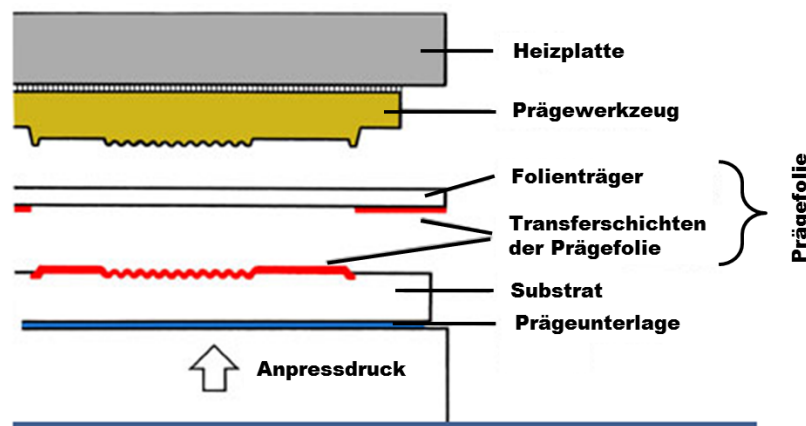


Abb. 2.6: Skizze der Prägefoliendruck-Variante „Microembossing“. Die Transferschichten der Prägefolie werden durch die Hitze des Prägewerkzeuges und den Anpressdruck auf das Substrat übertragen. Das Prägewerkzeug ist einer Hochdruckform ähnlich und ist mit einer Struktur auf der Oberfläche versehen. Das Substrat ist nach dem Prägefoliendruckvorgang dreidimensional umgeformt. Bildquelle: [KUR12].

2.1.3 Prozessparameter

Bei dem Prägefoliendruck können folgende Prozessparameter definiert werden, die während des Prägefoliendruckvorgangs einstellbar sind und untereinander in engem Zusammenhang stehen:

- a) Die Prägetemperatur ist die Temperatur, auf welche das Prägewerkzeug aufgeheizt wird und mit welcher der Prägefoliendruckvorgang stattfindet. Die Wahl der Prägetemperatur ist von dem Prägemotiv, dem Substrat, von den verwendeten Prägefolientypen und von der gewählten Arbeitsgeschwindigkeit abhängig. Je nach der Anwendung und dem Prägefolientyp liegen die Prägetemperaturen im grafischen Bereich zwischen 80 °C und 230 °C [KUR08, KUR10, KUR11].
- b) Der Anpressdruck ist die Kraft, mit welcher das Prägewerkzeug mit der Prägefolie in Kontakt tritt. Der Wert variiert in unterschiedlichen Bereichen bis zu mehreren Hunderten von kN, wobei er je nach dem Prägefoliendruckmaschinentyp bzw. der Auslegung des Prägefoliendruckwerkes anders definiert werden kann.
- c) Die Prägezeit gibt die Zeit wieder, über die die Prägetemperatur und der Anpressdruck auf die Prägefolie auf dem Substrat einwirken können, damit eine bessere Fixierung des Prägemotives durch eine partielle Ablösung der Transferschichten erfolgen kann. Bei einer normalen Anwendung liegt die Prägezeit zwischen 0,1 Sekunden und ca. 10 Sekunden [BAI03].

Alle diese Prozessparameter sind jeweils von dem Prägefoliendruckmaschinentyp, der Oberflächengestalt des Prägewerkzeuges, dem Prägefolientyp, dem Substrat und weiteren Prozessparametern und -materialien abhängig [ARB05, LIE97].

2.1.4 Prägefoliendruckmaschinen

Hinsichtlich des Produktionsprozesses werden in der grafischen Industrie drei Druckmaschinentypen, die ebenfalls für den Prägefoliendruck relevant sind, unterschieden [KIP00, TES05]:

a) „Flach auf Flach“-Drucksysteme, in der Praxis auch „Hubmaschinen“ genannt, verfügen über eine flache Druckform (beim Prägefoliendruck: Prägewerkzeug) und Gegendruckform (bei „Flach auf Flach“-Auslegung: Gegendruckplatte) (Abb. 2.7) [ARB05, KIP00].

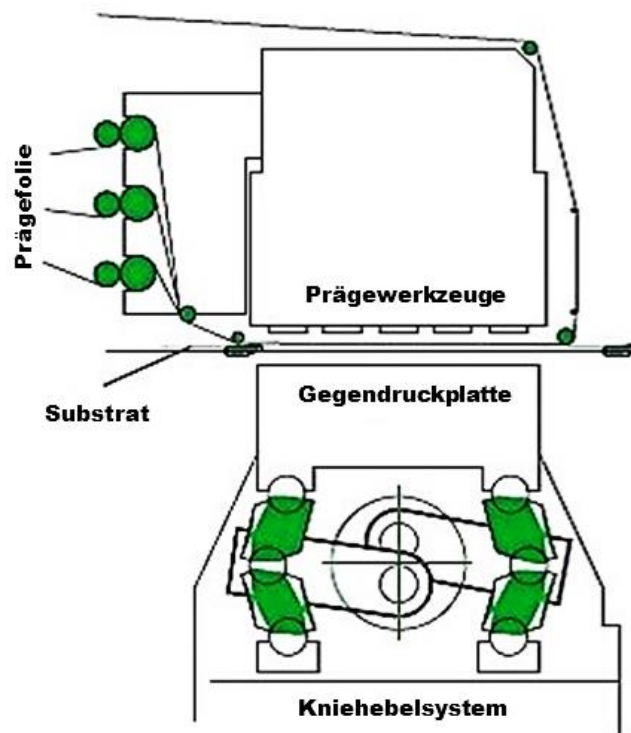


Abb. 2.7: Skizze einer Prägefoliendruckmaschine „Flach auf Flach“. Sowohl das Prägewerkzeug als auch die Gegendruckplatte sind flach. Die Gegendruckplatte wird durch das Kniehebelsystem in Bewegung gebracht. Bildquelle: [ARB05].

Durch eine gesteuerte Hubbewegung der Gegendruckplatte in die Richtung des Prägewerkzeuges wird die Prägefolie mit einem definierten Anpressdruck auf das Substrat gepresst. Hierdurch beginnt der Prägefoliendruckvorgang.

Der Anpressdruck ist über die gesamte Fläche des Prägewerkzeuges gleichmäßig verteilt. Die Prägezeit entspricht der Zeit des Kontakts des Prägewerkzeuges mit der Prägefolie und dem Substrat [ARB05].

Die Anpressdruckerzeugung bei den Hubmaschinen erfolgt nach dem Kniehebelprinzip. Moderne Prägefoliendruckmaschinen können mit bis zu vier Kniehebelpaaren ausgerüstet werden, die eine noch gleichmäßigere Verteilung des Anpressdrucks über die Prägewerkzeugfläche ermöglichen [ARB05]. Statt der Gegendruckplatte kann das Prägewerkzeug selbst, ebenfalls mittels eines Kniehebelsystems in Bewegung gebracht werden [BAI10].

b) „Rund auf Flach“- Druckmaschinen verfügen über einen Druckzylinder. Bei solchen Prägefoliendruckmaschinen ist das Prägewerkzeug flach, aber der Druckzylinder, auf dem auch die Gegendruckform angebracht wird, rund (Abb. 2.8).

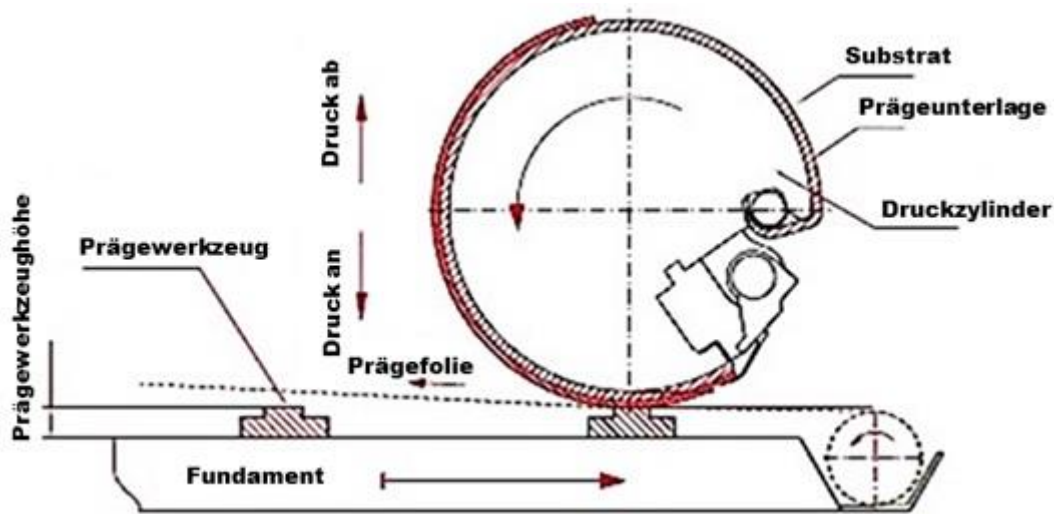


Abb. 2.8: Skizze einer Prägefoliendruckmaschine „Rund auf Flach“. Das Prägewerkzeug ist flach, die Gegendruckform mit dem Druckzylinder ist rund. Bildquelle: [ARB05].

Während des Prägefoliendruckvorgangs bewegen sich das Prägewerkzeug und der Druckzylinder synchron. Der Druckzylinder führt das Substrat mit sich. Die Prägefolie befindet sich parallel zum Prägewerkzeuglauf zwischen dem Prägewerkzeug und dem Substrat. Die Kontaktfläche ist eine stetig wandernde Linie, somit ist die Berührungs- bzw. Prägezeit sehr kurz.

c) „Rund auf Rund“- Druckmaschinen sind für den sogenannten Rotationsdruck gedacht. Der Prozess kann im Bogenformat, von Rolle zu Bogen oder von Rolle zu Rolle erfolgen und ist für größere Auflagen entwickelt worden (Abb. 2.9) [ARB05, KIP00].

Bei solchen Prägefoliendruckmaschinen sind sowohl das Prägewerkzeug als auch die Gegendruckform rund bzw. an Zylindern fixiert. An diesen Druckmaschinen lassen sich höchste Geschwindigkeiten beim Prägefoliendruck realisieren.

Die Kontrolle des Anpressdrucks sowohl bei „Rund auf Flach“- als auch bei „Rund auf Rund“-Prägefoliendruckmaschinen erfolgt durch eine elektrische Regelung, die den Anpressdruck bei einem niedrigen Wert selbsttätig bis zum Soll-Wert nachreguliert [ARB05].

Ausgehend vom Automatisierungsgrad werden halb- und vollautomatische Prägefoliendruckmaschinen unterschieden. Bei den ersteren erfolgt der Prozess ausschließlich „Flach auf Flach“ [ARB05].

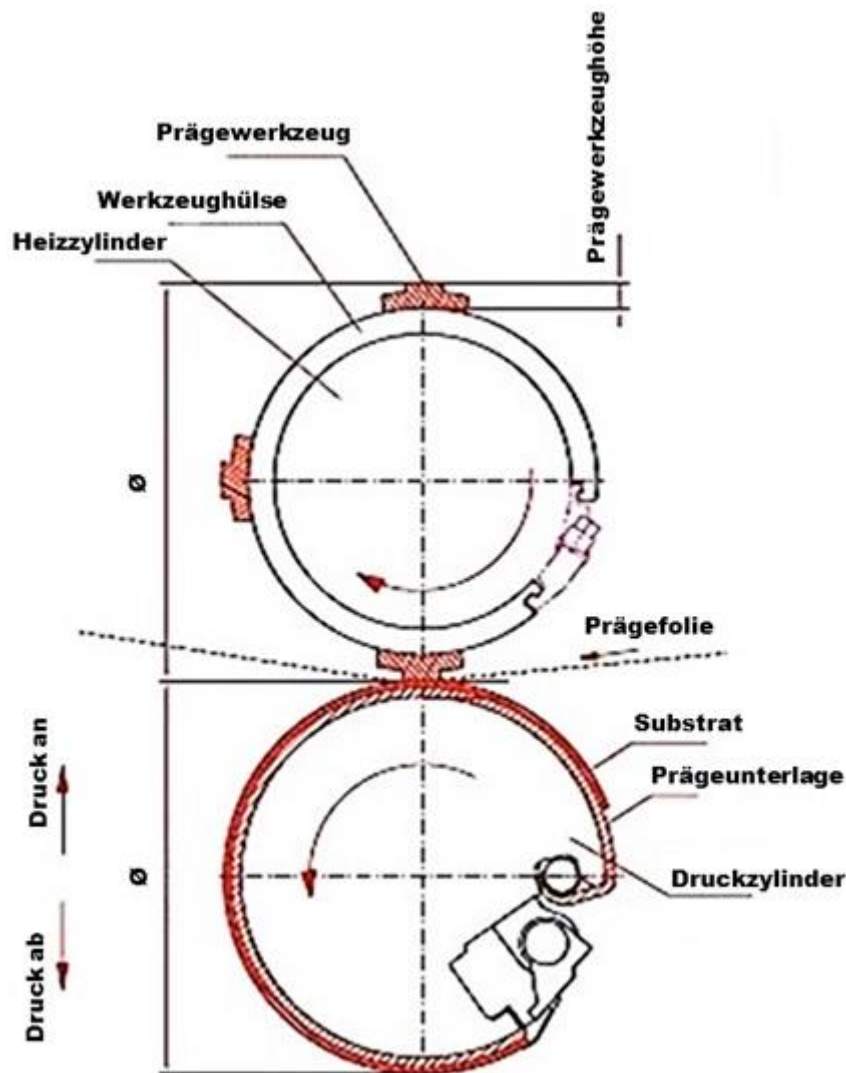


Abb. 2.9: Skizze einer Prägefoliendruckmaschine „Rund auf Rund“. Sowohl das Prägewerkzeug als auch die Gegendruckform/Druckzylinder sind rund. Bildquelle: [ARB05].

2.1.4.1 Erzeugung und Regelung der Prägetemperatur

Üblicherweise verfügen moderne Prägefoliendruckmaschinen über ein Heizsystem mit integrierten elektrischen Heizelementen. Dieses System befindet sich in der Prägeeinheit und wird über computergesteuerte Programme individuell geregelt. Die Temperaturwerte werden entsprechend der gewünschten Prägetemperatur an der Prägefoliendruckmaschine eingegeben. Das Programm steuert das automatische Ein- und Ausschalten der Heizelemente und damit das Konstanthalten der eingestellten Temperatur.

Bei den meisten Prägefoliendruckmaschinen sind die Heizsysteme in verschiedene Heizzonen unterteilt und separat regelbar. Dies gewährleistet eine bessere Temperaturführung während des Prägefoliendrucks. Damit wird auch erreicht, dass die Peripherie des Prägewerkzeuges stärker beheizt werden kann, weil an den Randzonen eine größere Wärmeabgabe stattfindet.

Bei einem Maschinenstillstand wird das Heizsystem ausgeschaltet. Damit wird eine Wärmeabsenkung gewährleistet und das Überhitzen vermieden. Außerdem wird dabei dafür gesorgt, dass beim erneuten Starten der Prägefoliendruckmaschine keine zu Qualitätsmängeln führende, erhöhte Prägetemperatur vorliegt.

Statt durch Heizelemente kann die Beheizung auch mit Thermoöl erfolgen, wobei die voreingestellte Prägetemperatur beim Neustart der Prägefoliendruckmaschine nach dem Stillstand nicht so präzise garantiert werden kann, wie bei Systemen mit Heizelementen [ARB05]. Bei solchen Anlagen wird das Öl in einem externen System aufgeheizt, welches dann das Prägewerkzeug auf die gewünschte Prägetemperatur bringt [KOL12]. Solche Systeme sind in der Praxis seltener anzutreffen.

Zur Kühlung kann entweder das Heizsystem abgeschaltet werden oder, in wenigen Fällen, kann ein externes System zum Einsatz kommen, welches die Kühlung der Prägeeinheit mittels durchströmenden Wassers oder Öles bewerkstelligt [KOL12].

2.1.5 Prägefolien

Der Aufbau einer Prägefolie ist in Abb. 2.10 dargestellt. Als Basis wird ein Folienträger aus Polyester (im Weiteren Polyesterträger genannt) verwendet, in der grafischen Industrie mit einer Dicke zwischen 12 μm und 19 μm [ARB84, NEN06], in der Kunststoffindustrie bis zu 50 μm [ARB05]. Polyester wird aufgrund seiner hohen mechanischen sowie thermischen und chemischen Beständigkeit zur Herstellung der Prägefolien verwendet [ARB05]. Seltener werden statt Polyester Pergamin oder andere Kunststofffolien eingesetzt [LIE97]. Der Polyesterträger dient als Transportmittel aller weiteren Schichten bei Herstellung, Lagerung, Vertrieb und bei der Verwendung der Prägefolie in der Prägefoliendruckmaschine [ARB84].

Auf den Polyesterträger wird eine Ablöseschicht [KUR12] oder anders genannt eine Trennschicht [ARB05] von ca. 0,01 μm im Tiefdruckverfahren aufgetragen. Allerdings sind die Angaben zur Schichtdicke unterschiedlich. So hat die Ablöseschicht nach Liebau [LIE97] eine Dicke von 0,2 μm .

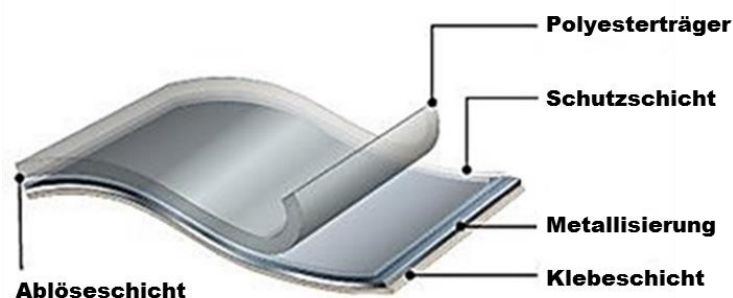


Abb. 2.10: Aufbau einer metallisierten Prägefolie mit einer der Herstellung entsprechenden Schichtreihenfolge: Polyesterträger, Ablöseschicht, Schutzschicht, Metallisierung und Klebeschicht. Bildquelle: [KUR12].

Die Ablöseschicht besteht im Wesentlichen aus einer Mischung von mehreren Wachsen und Harzen und ermöglicht ein problemloses Abziehen des Polyesterträgers beim Prägefoliendruckvorgang. Während des Prägefoliendruckvorgangs geht die Ablöseschicht durch Wärmeeinwirkung in den gasförmigen Zustand über [ARB05, HOT13], wodurch die

Trennung des Polyesterträgers von den Transferschichten der Prägefolie ermöglicht wird. Sie ist eine der wichtigsten Schichten im Aufbau der Prägefolien.

Ebenfalls im Tiefdruckverfahren wird in einem weiteren Schritt mindestens eine Schutzschicht aufgebracht. Für den Schutz der weiteren Schichten wird ein Lack verwendet. Die Schichtdicke der Schutzschicht liegt im Bereich von 1,0-1,5 μm .

Danach ist eine Metallisierung und anschließend eine Klebeschicht vorgesehen. Die Metallisierung besteht aus einer dünnen, im Hochvakuum aufgedampften Metallschicht, in den meisten Fällen aus Reinaluminium (99,98 %). Meistens sind solche Schichten sehr dünn und liegen im Bereich von 0,01-0,02 μm (nach Arbeitskreis Prägefoliendruck e.V. [ARB05]). Die Aluminium-Prägefolien der Firma LEONHARD KURZ Stiftung & Co. KG verfügen über eine Aluminiumschicht von 0,1 μm und werden mit einer Geschwindigkeit von 400 m/min produziert [NIE12].

Die letzte Schicht, die Klebeschicht, wird ebenfalls durch das Tiefdruckverfahren aufgebracht und hat eine Schichtdicke zwischen 0,8 μm und 1,5 μm [ARB05, HOT13, LIE97]. Sie besteht aus Harzen, Wachsen und diversen Füllstoffen, welche ab einer bestimmten Temperatur in einen flüssig-klebrigen Zustand übergehen [ARB05].

Verschiedenste transparente Einfärbungen der Schutzschicht ergeben die jeweiligen Farbwirkungen der metallisierten Prägefolien, die bei Herstellern in einer breiten Farbpalette angeboten werden. Statt einer Metallisierung werden auch Farblack, Metallpigmentlack, Transparentlack oder Effektpigmentlack verwendet, die zur Erzeugung anderer visueller Effekte in der grafischen Industrie vorgesehen sind und mit den anderen Schichten im Tiefdruckverfahren aufgebracht werden.

Zur Dekoration besonders wertvoller Bücher und Faksimiledrucke gibt es auf dem Markt auch Echtgold- und Bronzeprägefolien, deren Herstellung derjenigen von Aluminiumprägefolien ähnelt [ARB05, LIE97, ZAH90]. Für die Veredelung der Kunststoffteile in den Automobil- und Haushaltsindustrien werden auch Chromprägefolien eingesetzt.

Die aufgezählten Schichten (Reste der Ablöseschicht, Schutzschicht, Metallisierung und Klebeschicht) sind die Transferschichten der Prägefolie, die im Prägefoliendruckvorgang zeitgleich auf das Substrat übertragen werden.

Bezüglich der Eignung für unterschiedliche technische Einsatzgebiete werden die Prägefolien in drei Prägefolientypen eingeteilt: Leicht lösende, schwer lösende und Standardtypen. Diese Typen unterscheiden sich durch die Ablöse- und Klebeschichteigenschaften.

Bei den leicht lösenden Prägefolien sind die Ablöse- und Klebeschichten so ausgelegt, dass sie schon durch niedrigen Anpressdruck und geringe Wärmeenergie aktiviert werden. Solche Prägefolien sind vor allem für hohe Produktionsgeschwindigkeiten gedacht [ARB12].

Bei den schwer lösenden Prägefolien werden die entsprechenden Schichten erst bei relativ hohen Prägetemperaturen aktiviert. Dies verlängert gegebenenfalls die Prägezeiten. Allerdings erlauben diese Prägefolien feinere Prägemotive und eine niedrigere Kantenrauheit [ARB05].

Die Prägefolien des Standardtyps sind zwischen den beiden oben erläuterten Typen einzuordnen. Sie sind unter Prägefolien am Universellsten einsetzbar [ARB05].

2.1.6 Prägewerkzeuge

Die Prägewerkzeuge in der grafischen Industrie unterliegen hohen Anforderungen. Dies sind: Eine gute Verschleißfestigkeit (Härte), eine gute Korrosionsbeständigkeit, eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit sowie eine gute Bearbeitbarkeit [ARB05]. Als Prägewerkzeugwerkstoffe kommen Magnesium, Hartkupfer, Messing und Stahl in Betracht, obwohl in der Praxis aufgrund der relativ niedrigeren Kosten am häufigsten Messing verwendet wird. Für die Bearbeitung dieser Metalle sind das Gravieren und das Ätzen vorgesehen (Abb. 2.11) [ARB05, BOH55, GER73].



Abb. 2.11: CNC-Gravur eines Prägewerkzeuges aus Messing für „Rund auf Rund“-Prägefoliendruckmaschinen. Bildquelle: [ARB05].

Geätzt werden weichere Metalle, wie Magnesium und Hartkupfer. Bei sehr feinen Prägemotiven kommt außerdem Messing zur Anwendung und wird ggf. geätzt. Im Allgemeinen werden nur die Prägewerkzeuge „Plan“ geätzt. Die „Relief“-Prägewerkzeuge werden grundsätzlich nicht geätzt, können allerdings zur Beschleunigung des Herstellungsprozesses im ersten Schritt etwas angeätzt und danach graviert werden [ARB05, LIE97].

Magnesiumprägewerkzeuge, welche eine vergleichsweise geringe Härte besitzen, werden nur für kleinformatige Anwendungen (unter Format DIN A5) mit geringeren Anpressdrücken eingesetzt. Die Auflagenhöhe liegt zwischen 10.000 und 40.000 Prägegütern [ARB05], nach Liebau [LIE97] bei 50.000 Prägegütern.

Das etwas härtere Hartkupfer erlaubt höhere Anpressdrucke. Die Lebensdauer der Hartkupferprägewerkzeuge beträgt ca. 100.000 Prägegüter. Sie sind allerdings teurer als Magnesiumprägewerkzeuge [ARB05, LIE97].

In der grafischen Industrie werden vornehmlich Messing- und Stahlprägewerkzeuge benutzt, welche durch CNC-Gravur hergestellt werden. „Messing eignet sich besonders gut als Prägewerkzeugwerkstoff, da es eine hohe mechanische Festigkeit aufweist und trotzdem noch

gut bearbeitbar ist. Zudem besitzt es eine gute Wärmeleitfähigkeit sowie gute Korrosionsbeständigkeit. Die Auflagenhöhe liegt bei über 1.000.000 Prägegütern“ [ARB05]. Nach Liebau [LIE97] liegen die Auflagen mit den Messingprägwerkzeugen bei 35.000-40.000 Prägegütern. Um die Lebensdauer der Messingprägwerkzeuge zu erhöhen, können sie mit einer dünnen Nickelschicht beschichtet werden, welche allerdings die Herstellungskosten wesentlich erhöht [LIE97].

Für Auflagen von weit über 1.000.000 Prägegütern wird häufig Stahl als Prägwerkzeugwerkstoff benutzt. Die verzugsarmen Werkzeugstähle zeigen bei den üblichen Beanspruchungen wenige Abnutzungserscheinungen, haben allerdings gegenüber Messing die Nachteile, dass sie sich aufwändiger bearbeiten lassen und preislich in einem höheren Bereich liegen [ARB05, LIE97, REB04].

Wird von Messing als Ausgangswerkzeugwerkstoff ausgegangen, beträgt die Dicke der Messingplatte vor dem Gravieren 7 mm. Die Stahlplatten sind üblicherweise etwa 10 mm dick, ebenfalls vor dem Graviervorgang [ARB05, ARB84]. Die Graviertiefe bzw. die Höhe der erhabenen Stellen der Prägwerkzeuge liegt laut Patent DE 1992 71 75 A1 [PAT75] im Bereich von 0,5 mm bis 1,5 mm. Diese kann je nach dem benutzten Prägwerkzeugwerkstoffen und dem Layout variiert werden.

Außerhalb der grafischen Industrie, z. B. in der Kunststoffindustrie, wird mit sogenannten Silikonprägwerkzeugen geprägt. Diese Prägwerkzeuge besitzen einen Metallkern. Das Prägemotiv selbst wird allerdings durch eine Silikonschicht mit der Dicke 0,8 mm, 1,6 mm oder 3,2 mm gebildet [KRE13].

Vorstellbar ist es noch, Prägwerkzeuge durch eine Lasergravur herzustellen, was sich in der Praxis jedoch noch nicht durchgesetzt hat. Die entscheidende Rolle spielt dabei die noch nicht realisierbare Höhe der erhabenen Stellen auf dem Prägwerkzeug. Sie soll möglichst hoch sein (im wenigen mm-Bereich), um die dem Prägemotiv entsprechende Übertragung der Prägefolie zu gewährleisten.

2.1.7 Patrizen und Prägeunterlagen

Die formgetreuen Gegendruckformen für den Prägefoliendruck „Relief“ und „Struktur“ stellen die Patrizen dar [ARB05]. Um das dem Layout identische Prägemotiv und die gut haftende Prägefolienübertragung zu gewährleisten, müssen die Patrizen an allen Kontaktstellen zum Prägwerkzeug einen ausreichenden Anpressdruck aufbauen und dessen Konturen wiedergeben.

Da die Herstellung der Patrizen im Betrieb mit einem Zeitaufwand und einem Prägefoliendruckmaschinenstillstand verbunden ist, wird oft auf Fertigpatrizen zurückgegriffen. Sie werden durch direktes Abformen von Prägwerkzeugen realisiert. Als Materialien können verschiedene Kunststoffmischungen benutzt werden, die sich je nach dem Hersteller und dem Anwendungsbereich unterscheiden können.

Es werden zwei Arten von Patrizen unterschieden: Harte und flexible. Die Hartpatrizen werden für „Flach auf Flach“-Prägefoliendruckmaschinen eingesetzt. Bei hohen Auflagen

können sogar die Patrizen aus Messing hergestellt werden. Sie werden, wie auch die Messingprägewerkzeuge, durch eine CNC-Gravur gefertigt.

Für „Flach auf Rund“- und „Rund auf Rund“- Prägefoliendruckmaschinen kommen flexible Patrizen zum Einsatz. Sie verfügen über eine gewisse Biegsamkeit, die beim Aufbringen auf runde Druckzylinder notwendig ist [ARB05].

Die flache Ausführung einer Patrizie wird als Prägeunterlage bezeichnet und beim Prägefoliendruck „Plan“ benutzt. Die Prägeunterlage wird nach dem gleichen Prinzip ausgewählt. Sie muss eine gut haftende Prägefolienübertragung gewährleisten.

Beim Prägefoliendruck werden als Prägeunterlagen oft Offsetgummitücher und verschiedene Kunststoffe benutzt. Je nach Prägemotiv und der gewünschten Feinheit kann die Härte der Prägeunterlage variiert werden. Für vollflächige Prägemotive werden eher weiche Prägeunterlagen eingesetzt. Mit der Erhöhung der Auflösung steigt auch die Härte des Materials. Für feine Prägemotive können Metallplatten (für Hubmaschinen), dickerer Karton, Epoxid, Polyfol, Pertinax, Pressspan oder weitere Kunststoffe als Prägeunterlage verwendet werden [ARB05]. Die verschiedenen Prägeunterlagen können auch miteinander kombiniert werden.

2.1.8 Substrate

Wie schon erwähnt, wird der Prägefoliendruck in der grafischen Industrie in erster Linie als ein Druckveredelungsverfahren verstanden.

Generell eignen sich alle Materialien, die sich mit industriellen Druckverfahren bedrucken lassen. Das sind Papiere, Spezialpapiere, Kunststoffe und Kartons: Bedruckt; beschichtet; lackiert; kaschiert mit Folien, Leinen, Leder; gestrichen; naturbelassen; beflockt oder strukturiert [ARB12].

Da der Prägefoliendruck auf nichtsaugfähigen Substraten möglich ist, findet er eine verbreitete Anwendung in fast allen Branchen bei der Gestaltung und bei der Herstellung industrieller Erzeugnisse: In der Kunststoffindustrie, Automobilindustrie, Unterhaltungselektronik, Schuh-, Leder- und Möbelindustrie sowie im Telekommunikationsbereich [ARB05]. In diesem Zusammenhang besteht ein großes Spektrum möglicher Substrate mit unterschiedlichen Eigenschaften für den Prägefoliendruck.

2.1.9 Anwendung des Prägefoliendrucks im Elektronikbereich

Der Prägefoliendruck ist vor allem durch seine besonderen optischen Effekte bekannt, die dank der Vielfalt der Prägefolien und der Prägewerkzeuge realisierbar sind. Allerdings hat das Verfahren nicht nur bei der Veredelung und Dekoration verschiedener Teile seine Anwendung gefunden. Eines der weiteren Anwendungsfelder ist die Elektronik.

Schon in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts kam das Verfahren bei der Herstellung elektrischer Leiterbahnen und Leiterplatten zum Einsatz. Die Entwicklung von durch den Prägefoliendruck möglichen elektronischen Bauteilen kann bei einer Patentrecherche

nachvollzogen werden [PAT00, PAT03, PAT27, PAT32, PAT40, PAT51, PAT77, PAT98]. So sind solche Produkte, wie z. B. Leiterbahnen, elektrische Schaltungen, Solarzellen und RFID-Antennen, durch dieses Verfahren teilweise oder komplett realisierbar [LEI09]. Bei den meisten Anwendungen kommen allerdings andere Prägefolien zum Einsatz. Diese bestehen oft aus relativ dicken, reinen Kupferschichten (4-100 μm), die mit weiteren Metallschichten, wie z. B. Chrom oder Nickel, und speziellen Haftsichten (das Haften erfolgt nicht durch Kleben, sondern durch die Oberflächenrauheit der Prägefolien) versehen werden können [BOL13, RIC11].

Nicht zuletzt wird auf den Prägefoliendruck bei der Realisierung der MID-Technologie (Molded Interconnect Devices) zurückgegriffen. Dabei werden die metallischen Leiterbahnen auf spritzgegossene Kunststoffträger aufgebracht [BOL13, MID13]. Da diese Anwendung nicht aus der grafischen Industrie kommt, ist das Verfahren im Anwenderkreis nur als Heißprägen bekannt. Das Prozessprinzip ist mit dem des ursprünglichen Prägefoliendrucks identisch. Aufgrund seiner niedrigen Kosten zeigt das Verfahren bei der MID-Anwendung ein großes Potenzial, wobei einige Probleme zu lösen sind: Eines davon ist die Kontaktierung der Leiterbahnen mit den weiteren Komponenten des Gesamtsystems [SCH03].

2.2 Prägefoliendruckmaschine GEBA 6

Am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren (IDD) steht eine Prägefoliendruckmaschine GEBA Typ 6 der Firma Baier GmbH & Co KG zur Verfügung (Abb. 2.12).

Klassifiziert nach dem Druckmaschinentyp ist es eine „Flach auf Flach“-Prägefoliendruckmaschine oder anders genannt eine Hubmaschine.

Die Grundausstattung dieser Prägefoliendruckmaschine entspricht den seriengefertigten GEBA-6-Prägefoliendruckmaschinen, allerdings mit der Besonderheit, dass die meisten Prozessparameter regulierbar sind, was gleichzeitig eine exakte Kontrolle und Genauigkeit des Prägefoliendruckvorgangs erlaubt. Dies ist vor allem für Forschungszwecke vorgesehen. Das Arbeitsprinzip der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 unterscheidet sich von dem industrieller Anlagen nicht. Bislang gibt es weltweit nur zwei Prägefoliendruckmaschinen mit einem derartigen Aufbau (Stand: Jahr 2010).



Abb. 2.12: Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 [BAI10] am IDD: 1 – Arbeitsbildschirm mit Touch-Panel; 2 – Prägeeinheit; 3 – Prägeunterlage; 4 – Prägefolienumlenkrolle des Prägefolienvorschubapparats; 5 – pneumatisch angetriebener Prägetisch mit Festhalteleiste; 6 – Zweihand-Starttaster für Startauslösung der Prägefoliendruckmaschine, Stoptaste und Not-Aus-Taste; 7 – Pneumatikplatte; 8 – Gestell mit einstellbaren Füßen; 9 – Handrad für Prägetischhöhenverstellung; 10 – Hauptschalter; 11 – Prägefolienumlenkrolle des Prägefolienvorschubapparats; 12 – Prägefolienvorschubapparat mit Abwicklungs- und Aufwicklungsrollen. Bildquelle: [IDD12].

In Tabelle 2.2 sind die wichtigsten technischen Daten der GEBA 6 zusammengefasst. Es besteht die Möglichkeit, die Prägewerkzeuge in verschiedenen Formaten zu nutzen. Es stehen zwei austauschbare Heizblöcke in den Formaten DIN A4 und DIN A5, die identisch sind, zur Verfügung.

Tabelle 2.2: Technische Daten der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 am IDD [BAI10].

<i>Angabe</i>	<i>GEBA 6</i>
Bauart	C-Ständer-Konstruktion
Maße	1500×1200×1860 mm
Gewicht	510 kg
Heizblock A4	210×300 mm
Prägewerkzeughalterplatte A4	210×330 mm (Schwalbenschwanzführung)
Heizleistung Heizblock A4	3300 Watt

<i>Angabe</i>	<i>GEBA 6</i>
Heizblock A5	150×210 mm
Prägewerkzeughalterplatte A5	150×240 mm (Schwalbenschwanzführung)
Heizleistung Heizblock A5	2200 Watt
Max. Heizleistung	3360 Watt
Prägetemperatur	bis 230 °C (über Steuerung)
Antrieb des Anpressdrucks	motorisch
Anpressdruck	0-40 kN (über Steuerung)
Prägezeit	0,1-9999,0 s (über Steuerung)
Prägetisch	400×450 mm
Höhenverstellung des Prägetisches	0-120 mm (über Spindel)
Prägefolienvorschubapparat	1-fach, von links nach rechts laufend, motorangetrieben (über Steuerung)
Max. Prägefolienbreite	230 mm

Außer den drei Prozessparametern, Prägetemperatur, Prägezeit und Anpressdruck, können weitere Parameter, wie Position und Geschwindigkeit der Prägeeinheit, Höhe des Prägetisches, Kühlzeit, Einlegezeit, Transportzeit und Entspannungszeit der Prägefolie, an der GEBA 6 eingestellt werden.

2.2.1 Prägeeinheit

Die Prägeeinheit der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 ist in Abb. 2.13 dargestellt.

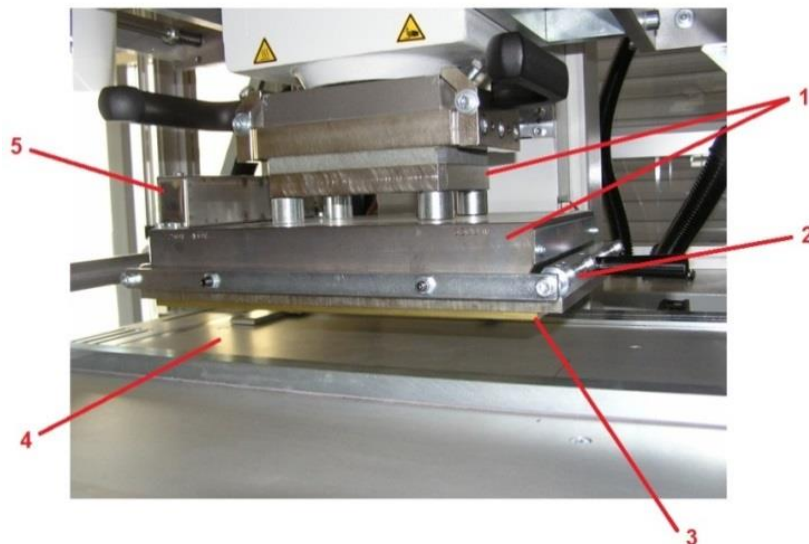


Abb. 2.13: Prägeeinheit und Prägetisch der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6: 1 – Heizblock mit integrierten Heizpatronen; 2 – Halterplatte für Prägewerkzeug; 3 – Prägewerkzeug; 4 – Prägetisch; 5 – Anschlussblock für Heizpatronen. Bildquelle: [BAI12].

Die wichtigsten Bestandteile der Prägeeinheit sind die Heizblöcke, in denen die Heizpatronen (in Abschnitt 2.1.4.1 als Heizelemente erwähnt) eingebaut sind. Die Heizblöcke sind in den beiden Formaten aus Grauguss gefertigt. Die Leitungsdrähte der Heizpatronen werden in

einem Anschlussblock zusammengeführt, welcher mit weiteren Teilen der GEBA 6 elektrisch verbunden wird.

An den Heizblock wird im nächsten Schritt eine formatmäßig passende Halterplatte fixiert. An dieser Halterplatte wird vorher das gewünschte Prägwerkzeug festgeschraubt.

Die beiden Heizblöcke haben in Abhängigkeit vom Format eine unterschiedliche Anzahl an Heizpatronen. Der Heizblock A5 verfügt über vier kleine Heizpatronen (195 mm), der Heizblock A4 – über sechs große Heizpatronen (285 mm) (Zeichnungen siehe Anhang 1). Die Skizze einer Heizpatrone mit technischen Angaben ist in Abb. 2.14 dargestellt.

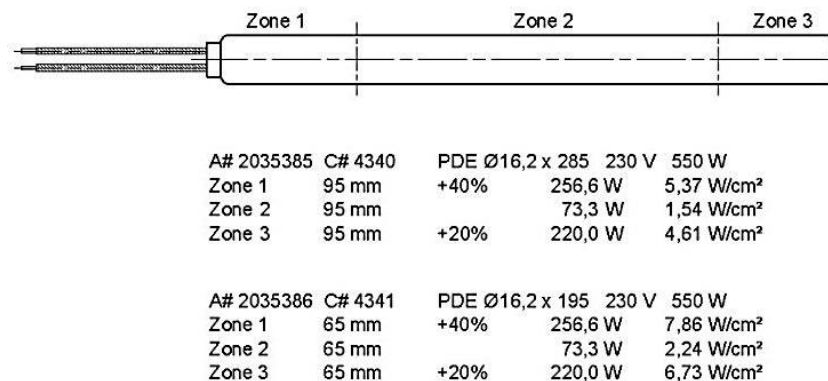


Abb. 2.14: Skizze einer Heizpatrone des Typs PDE der Firma Keller Ihne & Tesch KG der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 mit technischen Angaben für beide mögliche Heizblockformate: DIN A4 (die oberen Angaben) und DIN A5 (die unteren Angaben). Bildquelle: [BAI12].

Die Heizpatronen werden von der Firma Keller Ihne & Tesch KG geliefert (Spezifikation der Heizpatronen Typ PDE siehe Anhang 2). Die Besonderheit liegt in der Gliederung der Heizpatronen in drei Zonen, in welchen unterschiedliche Wärmeströme erzeugt werden. Diese sind vom Hersteller für die Gewährleistung einer gleichmäßigen Temperaturverteilung in der Prägeeinheit gewählt.

2.2.2 Prägefolienvorschubapparat

Die Prägefolie wird als Rolle über den Prägefolienvorschubapparat in die Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 zugeführt (schematische Darstellung des Prägefolienvorschubapparats siehe Abb. 2.15). Die Prägefoliolenrolle hat in der Praxis die Breite des Prägeformats 210 mm (+ max. 20 mm) beim Heizblock A4 und 150 mm (+ 20 mm) beim Heizblock A5. Sie wird auf der Abwicklungsrolle fixiert. Entsprechend der Skizze in Abb. 2.15 wird die Prägefolie über die Prägefolienumlenkrollen zur Aufwicklungsrolle geführt und dort befestigt.

Während des Prägefoliendrucks wird die Prägefolie nach jedem Prägefoliendruckvorgang automatisch weiter zur Aufwicklungsrolle transportiert. Damit wird der Polyesterträger mit den Resten der Transferschichten auf der Aufwicklungsrolle gesammelt und die ungeprägte Prägefolie für den nächsten Prägefoliendruckvorgang dem Prägwerkzeug zugeführt.

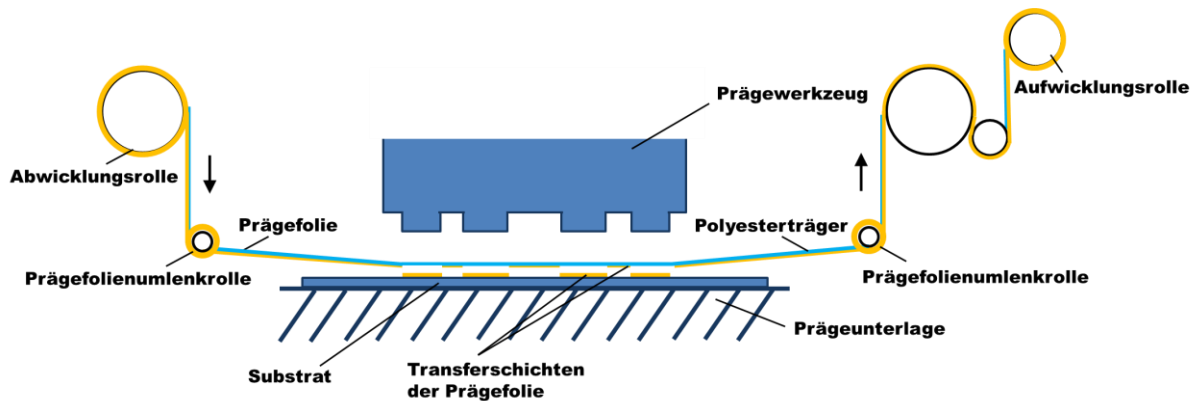


Abb. 2.15: Skizze des Prägefolienvorschubapparats der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 mit der schematischen Darstellung der Prägefoliensführung. Die Prägefolie wird auf die Abwicklungsrolle fixiert und über die Prägefolienumlenkrollen zur Aufwicklungsrolle geführt.

2.2.3 Erzeugung und Regelung der Prägetemperatur

Über den Arbeitsbildschirm der GEBA 6 besteht die Möglichkeit, eine Soll-Temperatur des Prägewerkzeuges einzustellen. Daneben wird gleichzeitig die Ist-Temperatur angezeigt, die aus dem Signal von mehreren Sensoren des Typs Pt100 berechnet wird. Die Sensoren Pt100 sind in jedem Heizblock integriert (im Heizblock A4: drei Sensoren Pt100, im Heizblock A5: zwei Sensoren Pt100). Wo die Sensoren Pt100 sich genau in den Heizblöcken befinden, gibt der Hersteller nicht bekannt.

Um die voreingestellte Soll-Temperatur zu erreichen, wird eine elektrische Spannung an die Heizpatrone im Heizblock angelegt, welche zu einer Erwärmung des Heizblocks führt. Wenn die Soll-Temperatur erreicht ist, werden die Heizpatronen ausgeschaltet. Sobald die Sensoren Pt100 eine Temperatur in der Prägeeinheit messen, welche unter dem Soll-Wert ist, werden die Heizpatronen wieder eingeschaltet. Nach diesem Zweipunkt-Regelungsprinzip (laut Hersteller) wird die Ist-Temperatur in der Prägeeinheit in engen Grenzen gehalten, die jedoch nicht angegeben werden.

Die Kühlung der Prägeeinheit findet durch Wärmeabgabe an die Umgebung statt [BAI10]. Dafür ist kein externes Kühlungssystem vorgesehen.

2.2.4 Erzeugung und Regelung des Anpressdrucks

Der Anpressdruck der Prägeeinheit der GEBA 6 wird über das Kniehebelsystem erzeugt. Der Kniehebel setzt die Prägeeinheit mit dem Heizblock, der Halterplatte und dem Prägewerkzeug in Richtung des Prägetisches in Bewegung.

In Abhängigkeit von der Höhe des Prägetisches, unter Berücksichtigung der Dicken des Prägewerkzeuges, des Substrats und der Prägeunterlage, kann der Anpressdruck variiert werden. Ebenfalls können die Geschwindigkeit der Absenkung der Prägeeinheit und ihre Position beim Prägefoliendruck über den Arbeitsbildschirm eingestellt werden.

Der Anpressdruck wird durch zwei Dehnungssensoren 9232A der Firma Kistler Instrumente GmbH [KIS13] (Abb. 2.16) aufgenommen und als Mittelwert der beiden angezeigt.



Abb. 2.16: Prägeeinheit der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6: 1 – einer der Dehnungssensoren 9232A; 2 – Heizblock mit integrierten Heizpatronen; 3 – Prägeeinheit. Der andere Dehnungssensor 9232A ist symmetrisch zu dem mit Nummer 2 angezeigten Dehnungssensor 9232A an der anderen Seite der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 positioniert.

Während des Anpressdruckaufbauvorgangs wird der Ist-Wert des Anpressdrucks zusammen mit dem Soll-Wert auf dem Arbeitsbildschirm angezeigt [BAI10]. Die Anzeige erfolgt in kN, was tatsächlich die Kraft, mit der das Prägewerkzeug mit Prägefolie in Kontakt tritt (siehe Abschnitt 2.1.3), charakterisiert. Deren Wert wird allerdings als Wert des Anpressdrucks an der GEBA 6 im Verlauf dieser Arbeit übernommen.

2.2.5 Steuerung der Zeitabschnitte

Über das Zeitmenü des Arbeitsbildschirmes der GEBA 6 besteht die Möglichkeit, weitere für den Prägefoliendruckvorgang relevante Zeiten festzulegen [BAI10].

Die Prägezeit ist der Zeitraum, in welchem der Prägefoliendruckvorgang stattfindet. Diese Zeit wird durch die Steuerung der Prägefoliendruckmaschine gestartet und gemessen, allerdings erst nachdem der Soll-Wert des Anpressdrucks erreicht ist. So ist das Prägen mit kurzen Zeitintervallen (unter 1 Sekunde) auf Hubmaschinen oft nicht möglich.

Außerdem kann die Kühlzeit eingestellt werden. Innerhalb dieser Zeit hat das Prägewerkzeug keinen Kontakt mehr mit der Prägefolie, aber der Polyesterträger ist nach dem Prägefoliendruckvorgang noch nicht abgezogen. Die Hubmaschinen erlauben Abkühlzeiten von bis zu einigen Minuten. Laut Baier GmbH [BAI03] beträgt die Abkühlzeit typischerweise zwischen 0,2 und 2 Sekunden.

Die Einlegezeit ist für einen automatischen Betrieb der Prägefoliendruckmaschine gedacht. Sie charakterisiert den Zeitraum, in welchem der Prägetisch in die Anfangsposition gebracht wird, um den nächsten Prägefoliendruckvorgang durchzuführen.

Innerhalb einer Transportzeit von einer Sekunde wird die abgenutzte Prägefolie mittels des Prägefolienvorschubapparats um ca. 10 cm weiter transportiert und auf die spezielle Aufwicklungsrolle gewickelt.

Als Entspannungszeit wird die Zeit bezeichnet, innerhalb welcher die Prägefolie direkt vor dem Prägefoliendruckvorgang entspannt wird. Dies gewährleistet die Kühlung der Prägefolie, die sich während des Transportes in der Nähe des Prägewerkzeuges um wenige Grade erwärmen kann. Außerdem wird dadurch das Durchreißen der Prägefolienbahn vermieden, welches im angespannten Zustand beim nachfolgenden Prägefoliendruckvorgang passieren kann.

2.2.6 Ablauf des Prägefoliendrucks

In Abb. 2.17 ist der Ablauf des Prägefoliendrucks an den „Flach auf Flach“-Prägefoliendruckmaschinen, unter anderem an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6, schematisch (Schema nach Conrad [CON02] und DIN 66001) dargestellt.

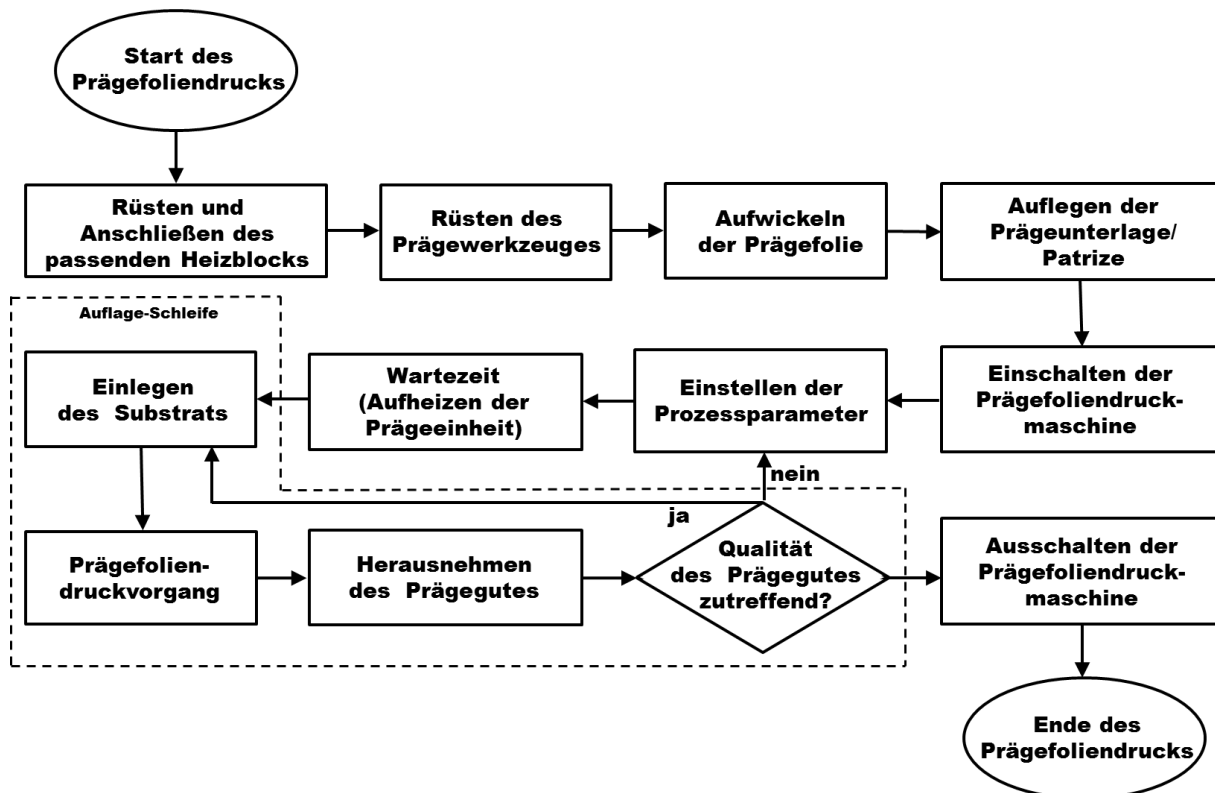


Abb. 2.17: Ablaufdiagramm des Prägefoliendrucks an den „Flach auf Flach“-Prägefoliendruckmaschinen.

Sobald die Prägefoliendruckmaschine betriebsbereit ist, wird die Entscheidung über das Format des passenden Heizblocks (falls mehrere vorhanden sind) getroffen, welcher in die Prägeeinheit montiert und angeschlossen wird. Als Nächstes wird das Prägewerkzeug auf der Halterplatte festgeschraubt und auf den Heizblock aufgesetzt und fixiert. Des Weiteren wird die Prägefolie über den Prägefolienvorschubapparat zugeführt und eine Prägeunterlage oder eine Patrizie auf den Prägetisch aufgelegt.

Erst wenn diese Schritte abgeschlossen sind, kann die Prägefoliendruckmaschine eingeschaltet werden. Als Nächstes kann die Einstellung der Prozessparameter erfolgen. Der nächste Schritt ist durch die Wartezeit charakterisiert, die für das Aufheizen der Prägeeinheit nach dem Einstellen der Soll-Temperatur nötig ist. Nach dem Einlegen des Substrats auf die Prägeunterlage/Patrize erfolgt der Prägefoliendruckvorgang, der durch die Betätigung der Starttasten gestartet wird. Nach dem Prägefoliendruckvorgang wird das fertige Prägegut herausgenommen.

Im nächsten Schritt wird die Entscheidung getroffen, ob die Qualität des Prägegutes den Anforderungen entspricht. Wenn nicht, werden die Prozessparameter neu eingestellt und ein neues Prägegut gefertigt. Wenn die Qualität des Prägegutes ausreichend gut ist, wiederholen sich die Schritte vom Einlegen des Substrats bis zum Herausnehmen des Prägegutes solange, bis die Auflage fertig ist. Nach der Fertigung des letzten Prägegutes endet der Prägefoliendruck, welcher mit dem Ausschalten der Prägefoliendruckmaschine abgeschlossen wird.

2.3 Stand der Wissenschaft

Speziell für den Prägefoliendruck existiert vor allem praxisorientierte Literatur, die an den Anwender gerichtet ist [ARB05, GER72, KIP00, LIE97, NEN06, REB04, ZAH90]. Hier werden das Prinzip des Verfahrens und Nuancen, die bei der Produktion grafischer Erzeugnisse wichtig sind und einen Einfluss auf das Prägeergebnis haben, beschrieben.

Die einzige auffindbare wissenschaftliche Arbeit zur Untersuchung des Prägefoliendrucks im Elektronikbereich entstand an der Hochschule der Medien (Stuttgart, Deutschland) im Jahr 2007 [LAC07] und wurde nicht veröffentlicht. Die Autorin versuchte, einen Zusammenhang zwischen Prozessparametern und Qualitätsmerkmalen der geprägten Leiterbahnen, Konturenverbreiterungen und elektrischem Widerstand, zu finden. Dabei stellte sich heraus, dass die Prägezeit bei der untersuchten Echtgoldprägefolie den größten Einfluss auf die Leiterbahnenbreite hatte. Danach folgte die Prägetemperatur, wobei der Einfluss der im Prozess einbezogenen Materialien nicht untersucht wurde. Ein direkter Zusammenhang zwischen den Konturenverbreiterungen der geprägten Leiterbahnen und ihren Widerstandswerten konnte nicht festgestellt werden. Im Allgemeinen zeigte die Prägefolie laut der Autorin keine gute elektrische Leitfähigkeit und eine Rissbildung in den geprägten Schichten [LAC07].

Wissenschaftliche Untersuchungen der Prägetemperatur und des Anpressdrucks während des Prägefoliendruckvorgangs wurden bisher nicht veröffentlicht. Sie fanden entweder nicht statt oder wurden bei den Herstellern der Prägefolien und Prägefoliendruckmaschinen intern durchgeführt und nicht veröffentlicht.

2.4 Zielsetzung und Vorgehensweise

Der bereits erläuterten Motivation und der Ausgangssituation zur Folge kann das Ziel für die gesamte Arbeit definiert werden: Das wissenschaftliche Wissen über den Prägefoliendruck soll speziell für Anwendungen im Elektronikbereich erweitert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird folgende Vorgehensweise gewählt: Als Erstes soll der Prägefoliendruckprozess für die „Flach auf Flach“-Prägefoliendruckmaschinen mit seinen Teilprozessen und als System mit seinen Eingangs- und Ausgangsparametern definiert und beschrieben werden. An dieser Stelle können mehrere Systemparameter, die einen Einfluss auf die Prägeergebnisse haben und in der Literatur unvollständig und unsystematisch dargestellt sind, aufgezählt werden. Die Ausgangsparameter sollen nach Anforderungen auf die Prägegüter als elektronische Bauteile definiert werden. Dabei sind die ursprünglich wichtigen optischen und haptischen Effekte der Prägefolien irrelevant.

Im Weiteren sollen die Eingangsparameter für den experimentellen Teil der Arbeit festgelegt werden. Einige davon können mittels unterschiedlicher Messtechnik genauer untersucht werden, um danach ihren Einfluss auf die Prägeergebnisse einschätzen zu können. Aus demselben Grund sollen beispielsweise die Temperaturen in der Prägeeinheit an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 gemessen werden. Damit könnte ein Beitrag zum Verständnis der Wärmeverteilung in der Prägeeinheit vor, während und nach einem Prägefoliendruckvorgang geleistet und ein Ansatz für die weitere Forschung und weitere Arbeiten zu diesem Thema dargestellt werden.

Die während der Prägefoliendruckexperimente an der GEBA 6 entstehenden Prägegüter sollen für die Untersuchung der Ausgangsparameter benutzt werden. Die Beurteilung soll quantitativ durchgeführt werden und dient sowohl zur Feststellung eines Zusammenhangs zwischen den eingehenden und ausgehenden Systemparametern als auch zur Bestimmung der im Prägefoliendruck realisierbaren Strukturgrößen. Weitere für den Elektronikbereich relevante Ausgangsparameter sollen ebenfalls systematisch untersucht, mit den Eingangsparametern abgestimmt und qualitativ bewertet werden.

Am Ende der Arbeit sollen die Erkenntnisse für die Anwendung des Prägefoliendrucks im Elektronikbereich zusammengefasst und an einigen realisierbaren Praxisbeispielen gezeigt werden.

Mit dieser Arbeit soll ein Beitrag zum besseren Verständnis des Prägefoliendrucks und seiner Teilprozesse geleistet werden, welcher nicht nur wissenschaftlich, sondern auch praxisorientiert ist. Die Darstellung der Ergebnisse soll vor allem auf die Anwendung des Verfahrens im Elektronikbereich ausgerichtet werden.

3. Analyse des Prägefoliendruckvorgangs

In diesem Kapitel wird der Prägefoliendruckvorgang an den „Flach auf Flach“-Prägefoliendruckmaschinen mit seinen Teilprozessen genauer beschrieben. Dies ermöglicht verschiedene Teilprozesse voneinander abzugrenzen und einzeln betrachten zu können. Gleichzeitig wird die Prozessgrenze festgelegt, entsprechend der die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden.

Als Weiteres wird ein Prägefoliendrucksystem festgelegt. Die Definition der Systemgrenze hinsichtlich räumlicher Parameter dient dabei ebenfalls der Abgrenzung der durchgeführten Untersuchungen. Für das definierte Prägefoliendrucksystem werden außerdem die Eingangs- und Ausgangsparameter und dabei auftretende Störfaktoren aufgezählt und einzeln beschrieben. Zur besseren Übersicht werden alle Systemparameter in Tabellen zusammengefasst. Ihre Definition erfolgt unter Berücksichtigung des Zieles dieser Arbeit: Anwendung des Prägefoliendrucks im Elektronikbereich.

3.1 Beschreibung des Prozesses und Definition der Prozessgrenze

Der in Abb. 2.17 (siehe Seite 23) dargestellte Ablauf des Prägefoliendrucks an den „Flach auf Flach“-Prägefoliendruckmaschinen kann in weitere Teilprozesse unterteilt werden. Allerdings ist der Teilprozess „Prägefoliendruckvorgang“ in Bezug auf das Ziel dieser gesamten Arbeit am interessantesten (Prozessabgrenzung nach Grafmüller [GRA00]), da innerhalb dieses Teilprozesses die Prägegüter entstehen. Er wird durch die in Abb. 3.1 dargestellten weiteren Teilprozesse beschrieben (nach Conrad [CON02] „Systematik der Prozessanalyse“).

Der Prägefoliendruckvorgang an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 wird mit dem Betätigen der Starttasten gestartet. Er erfolgt automatisch und beinhaltet folgende Schritte: Gleich nach dem Starten des Prägefoliendruckvorgangs erfolgt das Einfahren des Prägetisches in die Prägeposition, bis sich der Prägetisch mit der Prägeunterlage und dem Substrat genau unterhalb des Prägewerkzeuges befindet. Als Nächstes wird die Prägefolie im Prägefolienvorschubapparat weiter transportiert, um einen ungeprägten Abschnitt der Prägefolie nutzen zu können. Dieser Teilprozess kann zeitlich gesteuert und durch die Dauer der Transportzeit am Arbeitsbildschirm voreingestellt werden.

Danach wird die Prägefolie entspannt. Dieser Teilprozess ist ebenfalls zeitlich steuerbar und wird durch die Entspannungszeit charakterisiert. Anschließend erfolgt das Heranfahren der Prägeeinheit an den Prägetisch, auf dem sich die Prägeunterlage und das Substrat bereits befinden.

In diesem Moment tritt das Prägewerkzeug mit der Prägefolie in Kontakt. Damit beginnt die Übertragung der Transferschichten der Prägefolie durch die Hitze des Prägewerkzeuges und den Anpressdruck auf das Substrat. Die Dauer dieses Teilprozesses wird als Prägezeit bezeichnet.

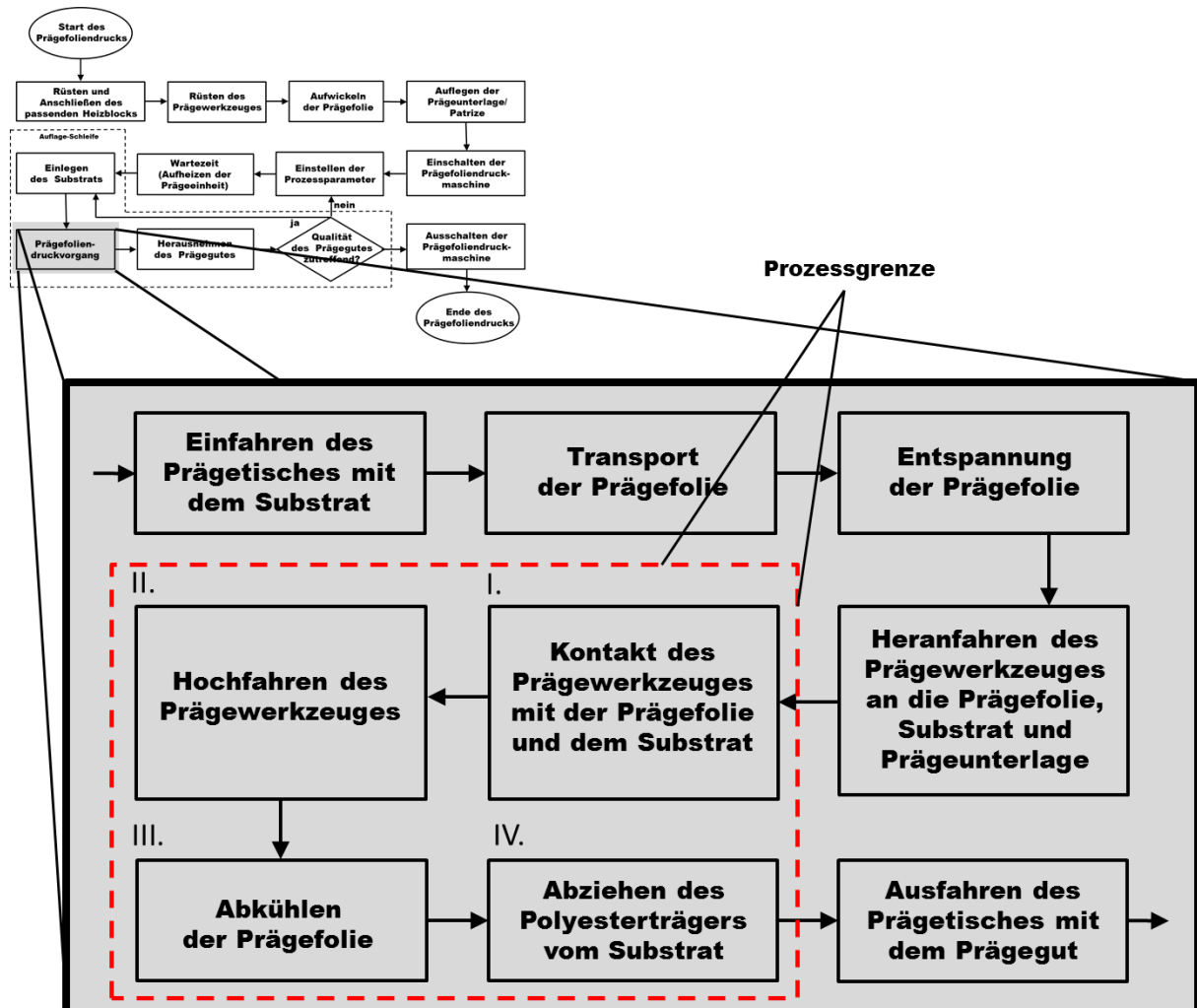


Abb. 3.1: Ablaufdiagramm der Teilprozesse beim Prägefoliendruckvorgang an den „Flach auf Flach“-Prägefoliendruckmaschinen. Die nummerierten Teilprozesse stellen die untersuchten Teilprozesse und damit die Prozessgrenze dar.

Im nächsten Schritt wird das in der Prägeeinheit fixierte Prägewerkzeug hochgefahren. Dabei bleibt die eben geprägte Prägefolie ohne Bewegung noch auf dem Substrat liegen. Hier beginnt der nächste Teilprozess „Abkühlen der Prägefolie“, der durch die Einstellung der Abkühlzeit gesteuert werden kann. Im Anschluss wird der Polyesterträger mit den Resten der Transferschichten vom Substrat abgezogen. Der Teilprozess „Prägefoliendruckvorgang“ endet mit dem Ausfahren des Prägetisches mit dem darauf verbleibenden Prägegut.

In Abb. 3.2 sind die relevanten Teilprozesse des Prägefoliendruckvorgangs nochmal schematisch dargestellt. Im Rahmen dieser Arbeit definieren sie die untersuchte Prozessgrenze.

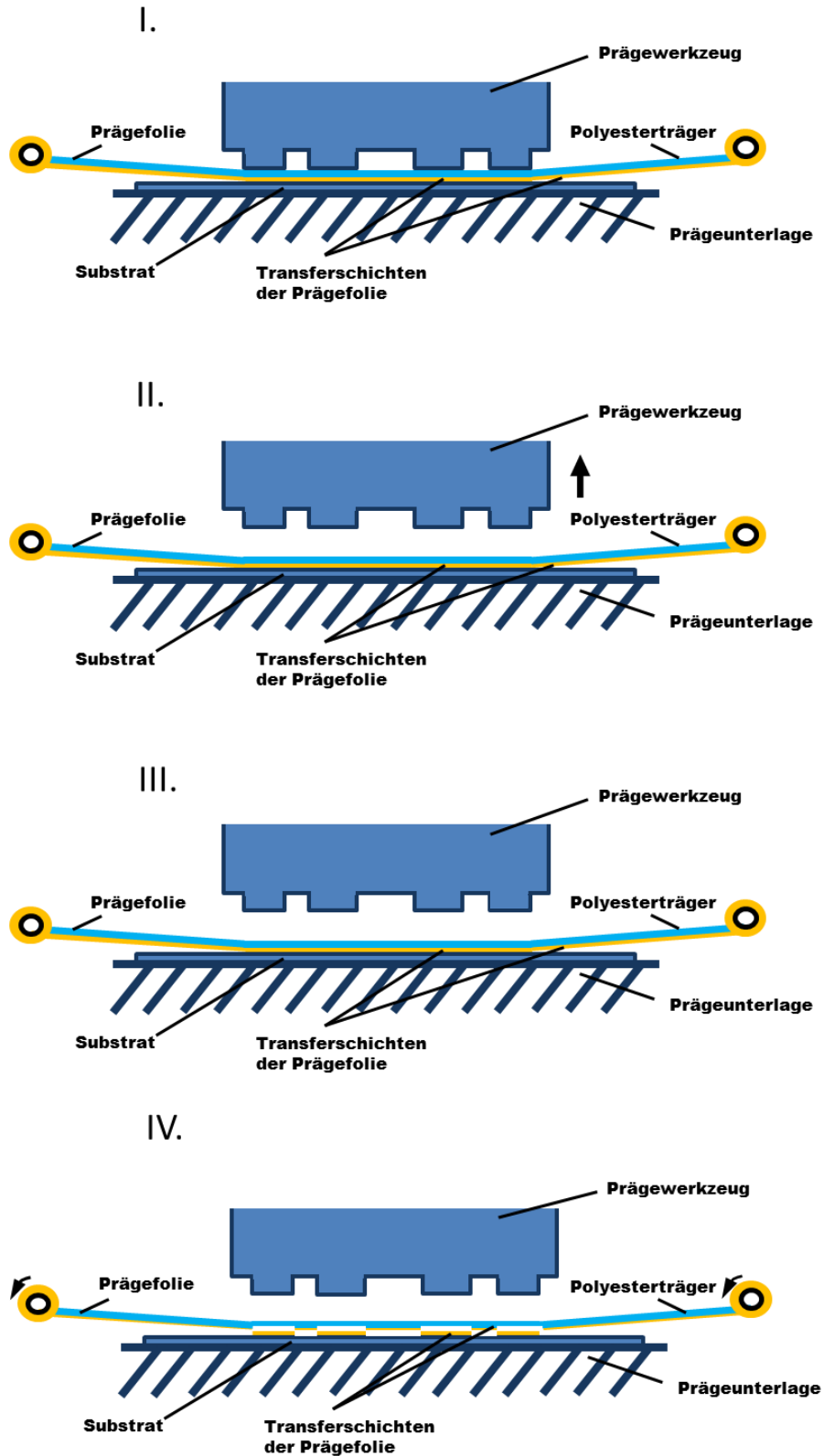


Abb. 3.2: Skizze der in der Arbeit untersuchten Teilprozesse I bis IV beim Prägefoliendruckvorgang. Die Nummerierung entspricht Abb. 3.1. I – Kontakt des Prägewerkzeuges mit der Prägefolie und Substrat; II – Hochfahren des Prägewerkzeuges; III – Abkühlen der Prägefolie; IV – Abziehen des Polyesterträgers vom Substrat.

Als Anfangszeitpunkt wird der Moment, in welchem das Prägewerkzeug mit der Prägefolie in Kontakt tritt, definiert. Als Endzeitpunkt im betrachteten Prägefoliendruckvorgang in Bezug auf die definierte Prozessgrenze wird der Moment, in dem der Polyesterträger vollständig vom Substrat entfernt wird, bezeichnet. Diese Zeitpunkte charakterisieren den zeitlichen Rahmen des untersuchten Prozesses.

3.2 Definition der Systemgrenze

Im Rahmen dieser Arbeit wird das folgende Prägefoliendrucksystem für die „Flach auf Flach“-Prägefoliendruckmaschinen, unter anderem für die GEBA 6, festgelegt und untersucht: In Abb. 3.3 ist die räumliche Systemgrenze (Notwendigkeit der Systemabgrenzung nach Siebertz [SIE10]) mit den Strichlinien gekennzeichnet.

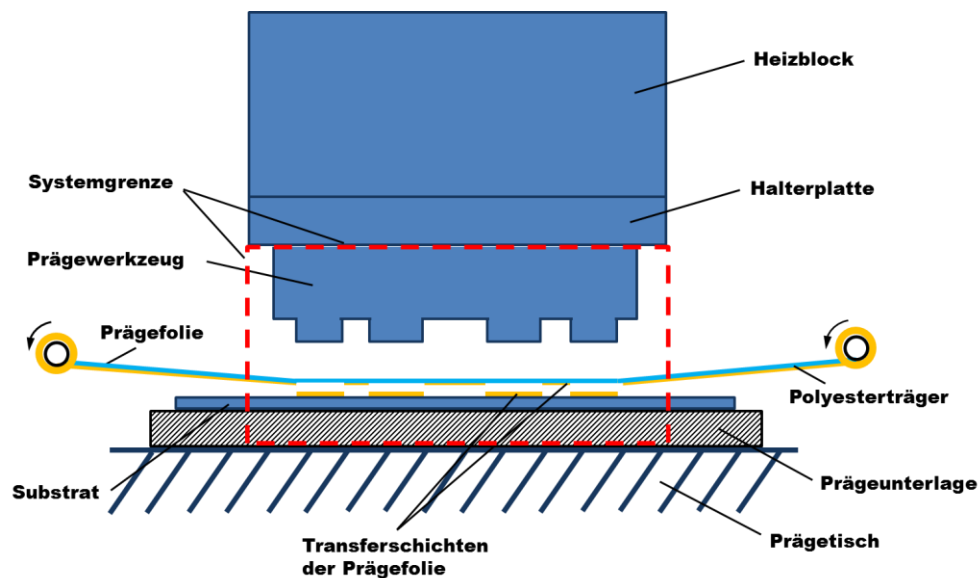


Abb. 3.3: Definition des Prägefoliendrucksystems. Die Systemgrenze ist mit den Strichlinien gekennzeichnet. Das Prägefoliendrucksystem beinhaltet Prägewerkzeug, Prägefolie, Substrat und Prägeunterlage.

Das untersuchte Prägefoliendrucksystem beinhaltet das Prägewerkzeug, die Prägefolie, das Substrat und die Prägeunterlage. Die Systemgrenze ist aufgrund der im Rahmen der Arbeit formulierten Zielsetzung aufgestellt, namentlich der Untersuchung des Prägefoliendruckvorgangs, die unabhängig vom Aufbau der Prägeeinheit durchzuführen ist.

Allerdings kann die Systemgrenze in Abhängigkeit von der Aufgabe der Untersuchung erweitert werden. Beispielsweise, um die Temperaturmessungen im weiteren Verlauf der Arbeit innerhalb von der Systemgrenze zu erlauben, wird die obere Grenze auf der Fläche der Halterplatte definiert. Wenn die Wärmeausbreitung in der Prägeeinheit berücksichtigt werden soll, können der Heizblock und die komplette Halterplatte in das System integriert bzw. die Systemgrenze entsprechend erweitert werden.

3.3 Definition der Systemparameter

Bei der Untersuchung eines technischen Systems ist es wichtig, relevante Eingangs- und Ausgangsparameter und Störfaktoren zu kennen [KLE03, SIE10]. Ihre Definition hängt oft von den Anforderungen, die an das System gestellt werden, ab (nach Unbehauen [UNB83, UNB02]).

Wird das in Abb. 3.3 gekennzeichnete Prägefoliendrucksystem mit dem Ziel der Anwendung des Prägefoliendrucks im Elektronikbereich betrachtet, kann das in Abb. 3.4 dargestellte Schema mit weiter beschriebenen Eingangs- und Ausgangsparametern angenommen werden.

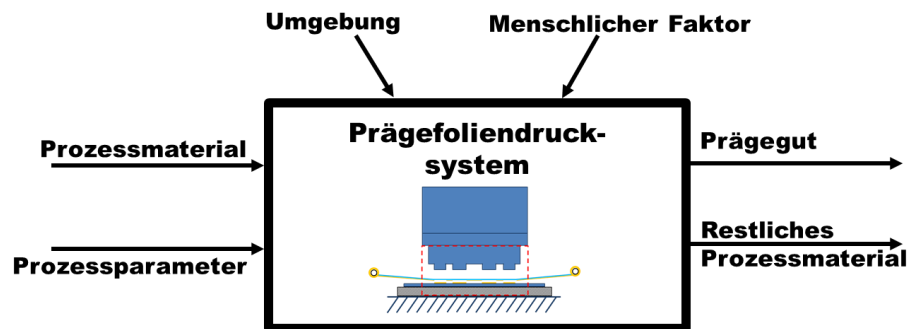


Abb. 3.4: Das definierte Prägefoliendrucksystem mit den Eingangsparametern: Prozessmaterial und Prozessparameter; den Ausgangsparametern: Prägegut und restliches Prozessmaterial; sowie den Störfaktoren: Umgebung und menschlicher Faktor.

Die Prozessparameter und das Prozessmaterial stellen die Eingangsgrößen dar. Die Eigenschaften eines Prägegutes sind hierbei die interessantesten Ausgangsgrößen. Zusätzlich können die restlichen Prozessmaterialien, das Prägewerkzeug und die Prägeunterlage, als Ausgangsgrößen betrachtet werden. Außer dem eigentlichen Prägegut existiert es als zusätzliches Prozessmaterial den Polyesterträger am Ausgang, welcher nach dem Prägefoliendruckvorgang übrig bleibt und am Ende entsorgt wird. Die Umgebungsbedingungen und der menschliche Faktor sind diejenigen Störfaktoren, welche den Prägefoliendruckprozess beeinflussen.

Nach Pahl [PAH07] und Conrad [CON02] finden in einem technischen System außer einem Materialaustausch (Prozessmaterial → Prägegut, restliches Prozessmaterial) auch ein Energie- und ein Signalaustausch statt. Die eingehende Energie wird bei der vorgenommenen Analyse des Prägefoliendrucksystems nur als thermische Energie (Prägetemperatur) und mechanische Energie des Prägewerkzeuges (Anpressdruck/Kraft) berücksichtigt. Die Ausgangsenergie wird dabei nicht betrachtet. Die Untersuchung des Signalaustauschs im betrachteten Prägefoliendrucksystem wird im Rahmen dieser Arbeit komplett ausgelassen.

3.3.1 Eingangsparameter

Die relevanten Eingangsparameter des untersuchten Prägefoliendrucksystems können in zwei Gruppen aufgeteilt werden (siehe Tabelle 3.1).

Tabelle 3.1: Schematische Darstellung der Eingangsparameter des in Abb. 3.3 dargestellten Prägefoliendrucksystems.

<i>Eingangsparameter</i>	
1. Prozessmaterial <u>1.1 Prägewerkzeug</u> <i>1.1.1 Werkstoff</i> a) Thermische Eigenschaften b) Mechanische Eigenschaften <i>1.1.2 Größe</i> <i>1.1.3 Dicke</i> <i>1.1.4 Auflösung des Prägelayouts</i> a) Prägestrukturgröße b) Zwischenabstand c) Anzahl Prägestrukturen pro Einheit <i>1.1.5 Kantenrauheit</i> <i>1.1.6 Oberflächenbeschaffenheit</i> <i>1.1.7 Profil</i> <u>1.2 Prägefolie</u> <i>1.2.1 Schichtaufbau</i> <i>1.2.2 Material einzelner Schichten</i> a) Thermische Eigenschaften b) Mechanische Eigenschaften c) Chemische Eigenschaften d) Rheologische Eigenschaften der Klebeschicht e) Elektrische Leitfähigkeit der Metallisierung <i>1.2.3 Dicken einzelner Schichten</i> <i>1.2.4 Homogenität einzelner Schichten</i> <i>1.2.5 Maschinenlaufrichtung</i> <u>1.3 Substrat</u> <i>1.3.1 Material</i> a) Mechanische Beständigkeit b) Thermische Beständigkeit c) Chemische Beständigkeit <i>1.3.2 Dicke</i> <i>1.3.3 Oberflächeneigenschaften</i> <u>1.4 Prägeunterlage</u> <i>1.4.1 Schichtaufbau</i>	2. Prozessparameter <u>2.1 Prägetemperatur</u> <i>2.1.1 Physikalische Größe</i> <i>2.1.2 Verteilung auf der Prägewerkzeugoberfläche</i> <u>2.2 Anpressdruck</u> <i>2.2.1 Physikalische Größe</i> <i>2.2.2 Verteilung über die Fläche des Prägewerkzeuges</i> <u>2.3 Prägezeit</u> <i>2.3.1 Dauer</i> <u>2.4 Abkühlzeit</u> <i>2.4.1. Dauer</i> <u>2.5 Abziehwinkel</u> <i>2.5.1 Physikalische Größe</i> <u>2.6 Abziehkraft</u> <i>2.6.1 Physikalische Größe</i> <u>2.7 Abziehzeit</u> <i>2.7.1 Dauer</i>

<i>Eingangsparameter</i>	
1. Prozessmaterial <i>1.4.2 Material einzelner Schichten</i> a) Härte b) Elastische und plastische Eigenschaften c) Thermische Eigenschaften <i>1.4.3 Oberflächenbeschaffenheit</i> <i>1.4.4 Größe</i> <i>1.4.5 Dicke</i>	2. Prozessparameter

- 1) *Das Prozessmaterial* umfasst, die im Folgenden genannten Komponenten, die während des Prägefoliendruckvorgangs verwendet werden.

- 1.1) *Prägewerkzeug*: Entscheidend bei einem Prägewerkzeug sind folgende Kriterien: Als Erstes, je nach Anwendung und Auflage, wird ein passender Werkstoff (1.1.1) für das Prägewerkzeug ausgewählt. Beim Prägefoliendruck spielen sowohl die thermischen (a) und mechanischen Eigenschaften (b) des Prägewerkzeugwerkstoffs, als auch seine Größe (1.1.2) und Dicke (1.1.3) eine wichtige Rolle. Als Zweites, abhängig von dem Werkstoff und dessen Eigenschaften, wird die passende Bearbeitungsmethode des Prägewerkzeuges gewählt: Ätzen oder Gravieren.

Das Prägeergebnis ist vom gewählten Prägelayout des Prägewerkzeuges abhängig. Seine Auflösung (1.1.4) wird durch die Größe (a) der gravierten Prägestrukturen und deren Zwischenabstand (b) charakterisiert. Die Anzahl der Prägestrukturen pro Einheit (c) (oft pro Zentimeter) ist die Hauptcharakteristik der Auflösung, ähnlich der anderen Druckverfahren.

Die Qualität der Bearbeitung der erhabenen Stellen auf dem Prägewerkzeug hat ebenfalls einen Einfluss auf das Prägeergebnis. Dazu können die Kantenrauheit (1.1.5) und Oberflächenbeschaffenheit (1.1.6) der gravierten Prägestrukturen gezählt werden. Nicht zuletzt können die Höhe bzw. das Profil (1.1.7) der erhabenen Stellen wichtig sein.

- 1.2) *Prägefolie*: Entscheidend bei einer Prägefolie sind der Schichtaufbau (1.2.1) (siehe Abb. 2.10 auf Seite 12) und die dafür verwendeten Materialien (1.2.2). Je nach Prägefolienanwendung werden die einzelnen Schichten aus unterschiedlichen Materialien hergestellt. Diese haben entsprechend unterschiedliche thermische (a), mechanische (b), chemische (c), bei einer Klebeschicht rheologische Eigenschaften (d) und bei der Metallisierung elektrische Leitfähigkeit (e), welche auch das Prägeergebnis beeinflussen. Zusätzlich spielen die Dicke (1.2.3), die Homogenität (1.2.4) und die Maschinenaufrichtung (1.2.5) bei der Herstellung der einzelnen Schichten eine wichtige Rolle.

- 1.3) *Substrat:* Das Prägeergebnis wird in diesem Zusammenhang von einigen Eigenschaften des Substratmaterials (1.3.1) beeinflusst. Dabei sollen dessen thermische (a), mechanische (b) und chemische Beständigkeit (c) berücksichtigt werden. Diese spielen unter anderem eine entscheidende Rolle bei der Auswahl der Prozessparameter, wie Prägetemperatur, Prägezeit und Anpressdruck.

Auf die Haftung der Prägefolien haben außerdem die Dicke (1.3.2) und die Oberflächenbeschaffenheit (1.3.3) des Substrats einen Einfluss.

- 1.4) *Prägeunterlage:* Bei den Prägeunterlagen ist das Material und, falls es mehrschichtig ist, der Schichtaufbau (1.4.1) und die Materialien (1.4.2) der einzelnen Schichten entscheidend. Ebenso, wie die Härte (a) des Materials, sollen elastische und plastische Eigenschaften (b), z. B. bei der Verformung der Oberfläche nach einem Prägefoliendruckvorgang, berücksichtigt werden. Die Prägeunterlage hat in diesem Zusammenhang einen Einfluss auf die Tiefe der Prägung in das Substrat. Je nach Anwendung können unterschiedliche Vertiefungen gefordert werden. Die thermischen Eigenschaften (c) der Prägeunterlage sowie ihre Oberflächenbeschaffenheit (1.4.3) sind auch wichtige Eingangsparameter.

Die Größe (1.4.4) und die Dicke (1.4.5) der Prägeunterlage haben insoweit einen Einfluss auf die Prägeergebnisse, als dass davon der Anpressdruck und dessen Verteilung auf der Fläche des Prägewerkzeuges während des Prägefoliendruckvorgangs abhängig sind.

- 2) *Die Prozessparameter* können entsprechend den definierten Teilprozessen (vergleiche mit Abb. 3.2) zugeordnet werden.

- 2.1) *Prägetemperatur:* Einer der Prozessparameter, der einen Einfluss auf das Prägeergebnis während des Prägefoliendruckvorgangs (Teilprozess I) hat, ist die Prägetemperatur, mit der das Prägewerkzeug mit der Prägefolie in Kontakt tritt. Diese ist, wie weitere Prozessparameter, im Wesentlichen vom Prägefoliendruckmaschinentyp abhängig. Die Prägeeinheit kann einen unterschiedlichen Aufbau bzw. andere Bestandteile mit unterschiedlichen thermischen Eigenschaften haben. Der Heizvorgang selbst kann durch verschiedene Heizsysteme mit unterschiedlicher Regelungstechnik durchgeführt werden. Von den thermischen Eigenschaften der Bestandteile der Prägeeinheit und unter anderem des Prägewerkzeuges hängt die Wärmeübertragung ab. Für sie ist die physikalische Größe der Prägetemperatur (2.1.1) und deren Verteilung auf der Oberfläche des Prägewerkzeuges (2.1.2) entscheidend.

- 2.2) *Anpressdruck:* Noch ein Prozessparameter, der eine Auswirkung auf den Prägefoliendruckvorgang (Teilprozess I) hat, ist der Anpressdruck, mit dem das Prägewerkzeug die Übertragung der Transferschichten der Prägefolie ermöglicht. Im Wesentlichen hängt dieser Eingangsparameter von Prägefoliendruckmaschinentyp und dem Prinzip der Erzeugung des Anpressdrucks in der Prägefoliendruckmaschine ab. Außerdem kann dazu auch die Prägeunterlage gezählt werden, von welcher die Verteilung des Anpressdrucks abhängig ist.

Dieser Prozessparameter kann durch die physikalische Größe (2.2.1) der erzeugten Kraft und deren Verteilung (2.2.2) auf der Fläche des Prägewerkzeuges während des Prägefoliendruckvorgangs charakterisiert werden.

- 2.3) *Prägezeit*: Der Zeitraum, in welchem der Teilprozess I des Prägefoliendruckvorgangs stattfindet, wird *Prägezeit* genannt. Der Spielraum dieses Eingangsparameters hängt stark vom Prägefoliendruckmaschinentyp ab. *Prägezeiten* von unter einer Sekunde lassen sich nur schwierig an den „Flach auf Flach“-Prägefoliendruckmaschinen einstellen. Sie können bis zu einigen Minuten betragen. Oft werden die eingestellten *Prägezeiten* sogar überschritten. Das liegt daran, dass der Zähler erst dann ausgelöst wird, wenn der eingestellte Anpressdruck erreicht wird. Dieser Vorgang benötigt in der Praxis mindestens eine zusätzliche Sekunde. Die *Prägezeit* steht in einem Zusammenhang mit der Druckgeschwindigkeit.

Für das untersuchte Prägefoliendrucksystem charakterisiert die *Prägezeit* die Dauer (2.3.1) des Teilprozesses I. Während dieser Zeit entfalten die anderen Prozessparameter, wie die *Prägetemperatur* und der *Anpressdruck*, ihre Wirkung.

- 2.4) *Abkühlzeit*: Der Zeitraum, ab dem Moment des Ablösens des Prägewerkzeuges von der Prägefolie, bis zum Moment, in welchem das Abziehen des Polyesterträgers beginnt, wird als *Abkühlzeit* definiert. Sie charakterisiert die Dauer (2.4.1) des Teilprozesses III.

Während dieser Zeit wird die durch die Hitze aktivierte Klebeschicht der Prägefolie abgekühlt. Durch diesen Teilprozess wird eine bessere Verbindung der übertragenen Transferschichten mit dem Substrat gewährleistet. Dies garantiert allerdings keine bessere Qualität des Prägegutes, da die Haftung der aktivierten Klebeschicht in erster Linie durch den Prägefoliendruckvorgang selbst bestimmt wird.

Die *Abkühlzeit* wird durch den Prägefoliendruckmaschinentyp bestimmt. Zur Beschleunigung des Produktionsprozesses kann die *Abkühlzeit* auf 0 Sekunden gesetzt werden, womit der Teilprozess III komplett ausgelassen wird.

- 2.5) *Abziehwinkel* φ_{ab} : Die Winkel, die das Substrat auf der Einlaufseite mit der Prägefolie und auf der Auslaufseite mit dem Polyesterträger (mit Resten der Transferschichten) bildet, sind die *Abziehwinkel* φ_{ab1} und φ_{ab2} . In der Annahme, dass das System symmetrisch aufgebaut ist, können die beiden *Abziehwinkel* φ_{ab1} und φ_{ab2} als gleich groß gesetzt werden, wie in Abb. 3.5 zu sehen ist.

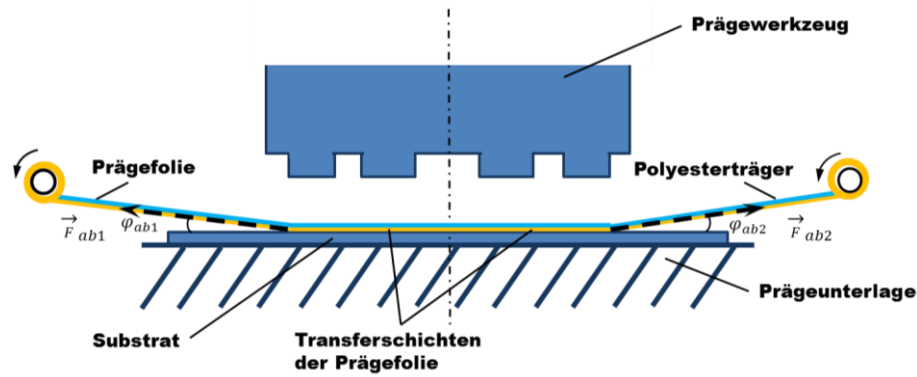


Abb. 3.5: Skizze des Teilprozesses IV beim Prägefoliendruckvorgang. F_{ab1} und F_{ab2} sind die Abziehkräfte, mit denen der Polyesterträger vom Substrat abgezogen wird und φ_{ab1} und φ_{ab2} sind die jeweiligen Abziehwinkel.

Dieser ist einer der Prozessparameter im Teilprozess IV, wenn der Polyesterträger vom Substrat abgezogen wird, und zweifach im untersuchten Prägefoliendrucksystem vorhanden. Er kann durch eine physikalische Größe (2.5.1) charakterisiert werden.

Der Abziehwinkel φ_{ab} hat einen Einfluss auf die Bildung der Kanten der geprägten Strukturen und in dieser Beziehung auch auf die Strukturgrößen. In Abhängigkeit vom Prägefoliendruckmaschinentyp und Aufbau des Prägefolienvorschubapparats wird der Polyesterträger mit den Resten der Prägefolie unter einem maschinenspezifischen Winkel (oft nicht regulierbar) vom Substrat abgezogen. Außerdem steht dieser Prozessparameter in Wechselwirkung mit der Prägeunterlage und dem Ablöseverhalten der Prägefolie, welcher vor allem vom Aufbau und den Eigenschaften der Trenn- und Klebeschichten bestimmt wird.

- 2.6) *Abziehkraft F_{ab} :* Sie charakterisiert die Kraft, mit welcher der Polyesterträger vom Substrat abgezogen wird. Diese Abziehkraft F_{ab} ist vom Prägefolienvorschubapparat der Prägefoliendruckmaschine und dem Ablöseverhalten der Prägefolie abhängig (Abb. 3.5).

Dieser Prozessparameter ist im Teilprozess IV des Prägefoliendruckvorgangs ebenso, wie der Abziehwinkel φ_{ab} , zweifach vorhanden: Von der Auflaufseite, an der die ungeprägte Prägefolie, und von der Auslaufseite, an der der Polyesterträger abgezogen wird. Die Abziehkräfte F_{ab1} und F_{ab2} können in Abhängigkeit vom Antrieb des Prägefolienvorschubapparats unterschiedlich sein und als physikalische Größen (2.6.1) angegeben werden.

Dieser Prozessparameter ist auch für die Kantenbildung und Größe der geprägten Strukturen relevant.

- 2.7) *Abziehzeit:* Der Zeitraum zwischen dem Moment, in dem die Abziehkräfte F_{ab1} und F_{ab2} an der Prägefolie und dem Polyesterträger unter einem angenommen gleichen Abziehwinkel φ_{ab} angreifen und dem Moment, in dem die Prägefolie und der Polyesterträger vom Prägegut komplett abgelöst werden, wird als Abziehzeit bezeichnet. Dieser Prozessparameter charakterisiert die Dauer (2.7.1) des Teilprozesses IV und ist an den Prägefoliendruckmaschinen nicht einstellbar.

3.3.2 Ausgangsparameter

Die für das untersuchte Prägefoliendrucksystem relevanten Ausgangsparameter können in zwei Gruppen aufgeteilt werden (Tabelle 3.2).

Tabelle 3.2: Schematische Darstellung der Ausgangsparameter des in Abb. 3.3 (siehe Seite 29) dargestellten Prägefoliendrucksystems im Hinblick auf die Anwendung des Verfahrens im Elektronikbereich.

<i>Ausgangsparameter</i>	
1. Prägegut	2. Weiteres Prozessmaterial
<u>1.1 Dimensionale Eigenschaften</u> <i>1.1.1 Homogenität</i> <i>1.1.2 Auflösung der geprägten Strukturen</i> a) Strukturgröße b) Zwischenabstand c) Anzahl der geprägten Strukturen pro Einheit <i>1.1.3 Kantenrauheit</i> <i>1.1.4 Schichtdicke</i> <i>1.1.5 Oberflächenrauheit</i> <u>1.2 Elektrische Eigenschaften</u> <i>1.2.1 Elektrische Leitfähigkeit der Metallisierung</i> a) Physikalische Größe b) Stabilität c) Homogenität d) Wiederholbarkeit <i>1.2.2 Elektrische Isolierfähigkeit der Klebe- und Schutzschicht</i> <i>1.2.3 Kontaktierungsfähigkeit</i> <u>1.3 Weitere Eigenschaften</u> <i>1.3.1 Thermische Beständigkeit</i> <i>1.3.2 Mechanische Beständigkeit</i> <i>1.3.3 Chemische Beständigkeit</i> <i>1.3.4 Alterungsbeständigkeit</i>	<u>2.1 Prägewerkzeug</u> <i>2.1.1 Zustandsänderung</i> <i>2.1.2 Lebensdauer</i> <u>2.2 Prägeunterlage</u> <i>2.2.1 Zustandsänderung</i> <i>2.2.2 Lebensdauer</i> <u>2.3 Polyesterträger</u>

- 1) *Das Prägegut* ist das Substrat mit entsprechend dem Prägemotiv übertragenen Transferschichten der Prägefolie. Es ist das Ergebnis eines Prägefoliendruckvorgangs und hat im Hinblick auf seine Anwendung als elektronisches Bauteil folgende relevanten Charakteristiken, die als Ausgangsparameter bezeichnet werden können:
 - 1.1) Zu den *dimensionalen Eigenschaften* gehören solche Eigenschaften, wie die Homogenität (1.1.1) der auf das Substrat übertragenen Transferschichten der Prägefolie. Dabei werden die Vollständigkeit der Übertragung der Transferschichten und ihre Homogenität (visuelle Gleichmäßigkeit), die direkt von der Qualität der einzelnen Schichten der Prägefolie abhängt, gezählt.

Zusätzlich spielt die Auflösung (1.1.2), die durch die Größe der geprägten Strukturen (a), deren Zwischenabstand (b) und die Anzahl der geprägten Strukturen pro Einheit (c) charakterisiert werden kann, eine Rolle.

Ein weiteres Qualitätsmerkmal ist die Kantenrauheit (1.1.3) sowie die gesamte Schichtdicke (1.1.4) der auf dem Substrat verbleibenden Transferschichten der Prägefolie. Die Oberflächenrauheit (1.1.5), die von der Oberflächenbeschaffenheit des Prägewerkzeuges und des Substrats beeinflusst wird, ist ein weiterer Ausgangsparameter beim Prägegut.

All diese Eigenschaften stehen in Wechselwirkung miteinander und sind für die elektronischen Bauteile genauso wichtig, wie die elektrischen Eigenschaften des Prägegutes.

- 1.2) *Die elektrischen Eigenschaften* sind ein maßgeblicher Ausgangsparameter des Prägegutes für die Anwendung im Elektronikbereich. Sie werden durch die elektrische Leitfähigkeit der Metallisierung (1.2.1) als physikalische Größe (a) und ihre zeitliche Stabilität (b), Homogenität (c) und Wiederholbarkeit (d) beschrieben. Dabei kann die elektrische Leitfähigkeit, die durch die Messung des elektrischen Widerstands ermittelt wird, beschrieben werden. Sie kann in Abhängigkeit von der Anwendung des elektronischen Bauteiles Werte in verschiedenen Größenordnungen annehmen.

Außerdem ist es für die Anwendung des Prägegutes im Elektronikbereich von hoher Relevanz, ob die Klebeschicht zwischen dem Substrat und der Metallisierung der Prägefolie und die Schutzschicht (falls die beiden vorhanden sind) durchgehend isolierend (1.2.2) sind oder doch die Möglichkeit eines Kurzschlusses besteht. Davon hängt ebenfalls die Möglichkeit zur weiteren Kontaktierung (1.2.3) des elektronischen Bauteils ab.

- 1.3) Als *weitere Eigenschaften* eines Prägegutes, welches als elektronisches Bauteil eingesetzt wird, können thermische (1.3.1), mechanische (1.3.2) und chemische (1.3.3) Beständigkeit aufgezählt werden. Diese sind für das spezifische Anwendungsgebiet des elektronischen Bauteils entscheidend.

Außerdem ist die Alterungsbeständigkeit (1.3.4) der Prägegüter ein wichtiger Ausgangsparameter.

- 2) Als *restliches Prozessmaterial* am Ende eines Prägefoliendruckprozesses werden folgende Materialien bezeichnet:

- 2.1) *Prägewerkzeug*: Dabei ist als Ausgangsparameter für das Prägewerkzeug dessen Zustandsänderung (2.1.1) relevant. Diese kann durch die Änderung aller aufgezählten Eingangsparameter beim Prägewerkzeug (siehe Tabelle 3.1 auf Seite 31) charakterisiert werden. Dadurch kann die Lebensdauer (2.1.2) des Prägewerkzeuges bestimmt werden.

- 2.2) *Prägeunterlage*: Wie auch das Prägewerkzeug, wird sie durch die Zustandsänderung (2.2.1) und die damit verbundene Lebensdauer (2.2.2) charakterisiert. Hier sind die

gleichen Kriterien, wie bei den Eingangsparametern der Prägeunterlage (siehe Tabelle 3.1 auf Seite 31), wichtig.

- 2.3) *Polyesterträger*: Am Ende des Teilprozesses IV verbleibt der Polyesterträger mit den Resten der Transferschichten der Prägefolie. Er wird am Ende des Prägefoliendrucks entsorgt. Daher sind dessen Eigenschaften für das untersuchte Prägefoliendrucksystem irrelevant.

3.3.3 Störfaktoren

Die Störfaktoren, die bei jedem technischen Prozess einen Einfluss auf die Ausgangsparameter haben, sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst.

Tabelle 3.3: Schematische Darstellung der Störfaktoren auf die Ausgangsparameter des in Abb. 3.3 (siehe Seite 29) dargestellten Prägefoliendrucksystems.

<i>Störfaktoren</i>	
1. Umgebung <u>1.1 Lufttemperatur</u> <u>1.2 Luftfeuchtigkeit</u> <u>1.3 Luftdruck</u> <u>1.4 Staub</u>	2. Menschlicher Faktor

- 1) *Umgebung*: Außer den Eingangsparametern können weitere Faktoren aus der Umgebung einen Einfluss auf die Qualität der Prägegüter im untersuchten Prägefoliendrucksystem haben.

Dazu wird die Lufttemperatur (1.1) der Umgebung gezählt, welche eine Wirkung auf das Aufheizen und Abkühlen der Prägeeinheit und deren Dauer hat. Dadurch wird auch die Prägetemperatur des Prägewerkzeuges beeinflusst. Außerdem kann die Lufttemperatur einen Einfluss auf die Prägeergebnisse haben, indem sie die Temperatur der Prägefolie vor und nach dem Prägefoliendruckvorgang bestimmt.

Von der Luftfeuchtigkeit (1.2) im Arbeitsraum können die Eigenschaften des Substrats und der Prägefolie beeinflusst werden. Außerdem können zu den Störfaktoren noch die Schwankung des Luftdrucks (1.3) und der Staub (1.4). Letzterer kann das Prägegut und einige seiner dimensional Eigenschaften (nach Tabelle 3.2 auf Seite 36) direkt beeinflussen.

- 2) *Menschlicher Faktor*: Ein Störfaktor, der bei vielen technischen Prozessen nicht auszuschließen ist, ist der menschliche Faktor. Unter diesem wird in erster Linie das Qualifizierungsniveau des Maschinenbedienpersonals verstanden.

3.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Analyse eines Prägefoliendruckvorgangs an den „Flach auf Flach“-Prägefoliendruckmaschinen, unter anderem auch an der GEBA 6, durchgeführt. Dabei wurde der Prägefoliendruckvorgang erstmalig als Prozess beschrieben und in Teilprozesse aufgeteilt, um verschiedene Vorgänge im Prozess voneinander abzugrenzen und einzeln betrachten zu können.

Als Nächstes wurden in Abschnitt 3.1 die Prozessgrenze und in Abschnitt 3.2 die räumliche Systemgrenze der Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit definiert.

In einem weiteren Schritt wurden in Abschnitt 3.3 die Systemparameter definiert, die für das in Abschnitt 3.2 definierte Prägefoliendrucksystem relevant sind. Hierzu gehören sowohl die Eingangs- und Ausgangsparameter als auch die Störfaktoren, die im Hinblick auf das interessierende Anwendungsgebiet des Verfahrens beschrieben wurden. Zur besseren Übersicht wurden die Systemparameter tabellarisch dargestellt.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die in dieser Arbeit zu untersuchenden Eingangs- und Ausgangsparameter festgelegt und schrittweise untersucht, um deren mögliche Zusammenhänge untereinander zu finden. In Kapitel 4 werden die Prozessmaterialien für das definierte Prägefoliendrucksystem ausgewählt und genauer untersucht.

4. Untersuchung der Eingangsparameter: Prozessmaterial

In diesem Kapitel werden die in Kapitel 3 beschriebenen und für das nach Abb. 3.3 (siehe Seite 29) definierte Prägefoliendrucksystem relevanten Prozessmaterialien untersucht. Dazu gehören Prägewerkzeug, Prägefolie, Substrat und Prägeunterlage.

Zuerst werden die Eingangsparameter für die jeweiligen Prozessmaterialien, die untersucht werden, festgelegt. Danach werden die konkreten Prozessmaterialien für das untersuchte Prägefoliendrucksystem und weitere Experimente an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 ausgewählt. Diese Auswahl wird im Hinblick auf die Anwendung des Prägefoliendrucks im Elektronikbereich getroffen. Dabei werden die Prägewerkzeuge und die Prägefolien variiert und jeweils zwei unterschiedliche in die Untersuchung einbezogen. Die Prägeunterlage und das Substrat werden nicht variiert und als konstante Eingangsgrößen im Prägefoliendrucksystem angenommen.

Das Ziel der Untersuchung der Prozessmaterialien ist es, einen möglichen Einfluss der Eingangsparameter auf die Prägeergebnisse bzw. die Ausgangsparameter im weiteren Verlauf dieser Arbeit nachvollziehen zu können.

4.1 Festlegung der Eingangsparameter

Im Hinblick auf die Anwendung des Prägefoliendrucks im Elektronikbereich gelten für einige Eingangsparameter besondere Anforderungen. Beispielsweise sollen die geprägten Strukturen über elektrische Eigenschaften verfügen. Gleichzeitig sollen die elektronischen Bauteile möglichst klein sein und im Aufbau vereinfacht werden. Diese Kriterien stellen Sonderanforderungen an die Eingangsparameter im Prägefoliendrucksystem dar. Unter deren Berücksichtigung werden im weiteren Verlauf dieses Kapitels die Eingangsparameter im betrachteten Prägefoliendrucksystem entsprechend Tabelle 3.1 (siehe Seite 31) ausgewählt, beschrieben und untersucht. Die Festlegung erfolgt in Abhängigkeit von im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung stehenden Messmöglichkeiten. Diese Eingangsgrößen sind in Tabelle 4.1 markiert und werden ebenfalls bei praktischen Experimenten für die Untersuchung der Ausgangsparameter einbezogen.

Tabelle 4.1: Schematische Darstellung der Eingangsparameter des in Abb. 3.3 (siehe Seite 29) dargestellten Prägefoliendrucksystems. Mit blau sind die untersuchten Eingangsparameter markiert.

<i>Eingangsparameter</i>	
1. Prozessmaterial	2. Prozessparameter
<u>1.1 Prägewerkzeug</u>	<u>2.1 Prägetemperatur</u>
<i>1.1.1 Werkstoff</i>	<i>2.1.1 Physikalische Größe</i>
a) Thermische Eigenschaften	<i>2.1.2 Verteilung auf der Prägewerkzeugoberfläche</i>
b) Mechanische Eigenschaften	
<i>1.1.2 Größe</i>	<u>2.2 Anpressdruck</u>
<i>1.1.3 Dicke</i>	<i>2.2.1 Physikalische Größe</i>
<i>1.1.4 Auflösung des Prägelayouts</i>	<i>2.2.2 Verteilung über die Fläche des Prägewerkzeuges</i>
a) Prägestrukturgröße	
b) Zwischenabstand	<u>2.3 Prägezeit</u>
c) Anzahl Prägestrukturen pro Einheit	<i>2.3.1 Dauer</i>
<i>1.1.5 Kantenrauheit</i>	
<i>1.1.6 Oberflächenbeschaffenheit</i>	<u>2.4 Abkühlzeit</u>
<i>1.1.7 Profil</i>	<i>2.4.1. Dauer</i>
<u>1.2 Prägefolie</u>	<u>2.5 Abziehwinkel</u>
<i>1.2.1 Schichtaufbau</i>	<i>2.5.1 Physikalische Größe</i>
<i>1.2.2 Material einzelner Schichten</i>	
a) Thermische Eigenschaften	<u>2.6 Abziehkraft</u>
b) Mechanische Eigenschaften	<i>2.6.1 Physikalische Größe</i>
c) Chemische Eigenschaften	
d) Rheologische Eigenschaften der Klebeschicht	<u>2.7 Abziehzeit</u>
e) Elektrische Leitfähigkeit der Metallisierung	<i>2.7.1 Dauer</i>
<i>1.2.3 Dicken einzelner Schichten</i>	
<i>1.2.4 Homogenität einzelner Schichten</i>	
<i>1.2.5 Maschinenlaufrichtung</i>	
<u>1.3 Substrat</u>	
<i>1.3.1 Material</i>	
a) Mechanische Beständigkeit	
b) Thermische Beständigkeit	
c) Chemische Beständigkeit	
<i>1.3.2 Dicke</i>	
<i>1.3.3 Oberflächeneigenschaften</i>	
<u>1.4 Prägeunterlage</u>	
<i>1.4.1 Schichtaufbau</i>	

<i>Eingangsparameter</i>	
1. Prozessmaterial	2. Prozessparameter
<i>1.4.2 Material einzelner Schichten</i>	
a) Härte	
b) Elastische und plastische Eigenschaften	
c) Thermische Eigenschaften	
<i>1.4.3 Oberflächenbeschaffenheit</i>	
<i>1.4.4 Größe</i>	
<i>1.4.5 Dicke</i>	

4.2 Prägewerkzeuge

4.2.1 Auswahl und Layout

Zur Untersuchung bzw. für die weiteren Experimente an der GEBA 6 werden zwei Prägewerkzeuge in der „Plan“-Variante (siehe Seite 6) mit identischem Layout angefertigt. Für diese Prägewerkzeuge werden zwei in der grafischen Industrie gängige Werkstoffe [GER73, LIE97] ausgewählt: Messing (MS58) und Stahl (1.4301). Bei beiden kommt das Gravieren als Herstellungsmethode zum Einsatz. Das Messingprägewerkzeug hat vor dem Gravieren eine Plattendicke von 7 mm, das Stahlprägewerkzeug – eine Plattendicke von 10 mm. Die beiden Prägewerkzeuge werden im Format DIN A5 des Heizblocks A5 angefertigt.

Eine minimale allgemein mögliche Prägestrukturgröße im Layout ist in der Praxis nicht bekannt, da es keine genauere Auskunft von Herstellerfirmen diesbezüglich gibt. Die Werte können allerdings auch von den Zwischenabständen abhängen. Nach Baier GmbH [BAI03] sollen die Linien unter 0,1 mm im Layout vermieden werden.

Das Layout für die Prägewerkzeuge ist in Abb. 4.1 abgebildet. Die in einem gleichen Abstand voneinander liegende Linien haben unterschiedliche Linienstärken: Von 10 µm bis 100 µm in 10-µm Schritten und von 200 µm bis 1000 µm (1 mm) in 100-µm Schritten. Damit kann vor allem die Realisierbarkeit feiner Strukturen durch den Prägefoliendruck untersucht werden, welche im Elektronikbereich eine wichtige Rolle spielt.

Um den Einfluss der nebeneinander liegenden Linien aufeinander auszuschließen, beträgt der Abstand zwischen den Linien 3 mm. Die auf dem Layout zu sehenden Vierecke sind die Kontaktflächen für Widerstandsmessungen und haben die Größe von 1,5×2,5 mm. Die Linienlänge zwischen den Kontaktflächen beträgt 30 mm.

Die Bearbeitungstiefe bzw. Höhe der erhabenen Stellen auf den beiden Prägewerkzeugen beträgt 1,4 mm und wurde vom Hersteller vorgegeben.

Um weitere Auswertungen bei den Prägewerkzeugen und Prägegütern zu erleichtern und übersichtlicher zu machen, werden die Linien entsprechend dem Layout durchnummeriert.

Die Nummerierung ist in Abb. 4.1 und Tabelle 4.2 zu sehen und wird im Verlauf dieser Arbeit beibehalten.

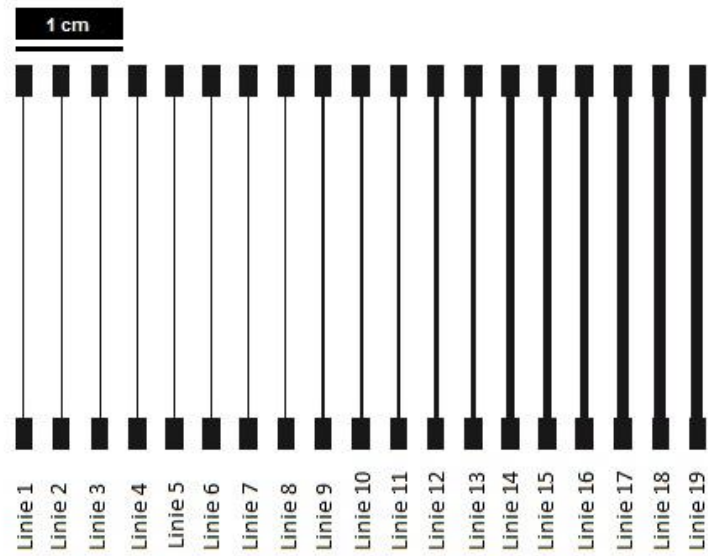


Abb. 4.1: Layout der Prägewerkzeuge mit entsprechender Nummerierung der Linien. Die Linien 1-10 haben die Linienstärke im Layout von 10 µm bis 100 µm in 10-µm Schritten und die Linien 11-19 – von 200 µm bis 1000 µm (1 mm) in 100-µm Schritten. Der Zwischenabstand beträgt 3 mm. Die Linienlänge auf dem Layout beträgt 30 mm. Die Kontaktflächen sind 1,5×2,5 mm groß.

Tabelle 4.2: Die entsprechend dem Layout in Abb. 4.1 nummerierten Linien und ihre Linienstärken.

#	Linienstärke [µm]
Linie 1	10
Linie 2	20
Linie 3	30
Linie 4	40
Linie 5	50
Linie 6	60
Linie 7	70
Linie 8	80
Linie 9	90
Linie 10	100
Linie 11	200
Linie 12	300
Linie 13	400
Linie 14	500
Linie 15	600
Linie 16	700
Linie 17	800
Linie 18	900
Linie 19	1000

4.2.2 Mikroskopische Untersuchung

In dieser Arbeit werden die Oberflächen der gravierten Linien der beiden Prägewerkzeuge mittels des Mikroskops Leica DM4000M [LEI13] und des optischen Profilometers Plμ Neox [SEN13] näher untersucht.

Zuerst werden der Verlauf der Kanten und die Homogenität der Oberfläche jeder einzelnen gravierten Linie mit dem Mikroskop Leica DM4000M mit 50-facher und 100-facher Vergrößerung visuell untersucht. Mit dem Sensofar Plμ Neox und dessen Konfokal-Mikroskopie-Modus [DIN09] mit 10-facher und 50-facher Vergrößerung können die Prägestrukturoberflächen nicht nur zweidimensional, sondern auch dreidimensional vermessen werden. Dabei werden stellenweise die Profile der Prägestrukturoberflächen bei einzelnen Linien aufgenommen und deren Oberflächenrauheit R_a bestimmt.

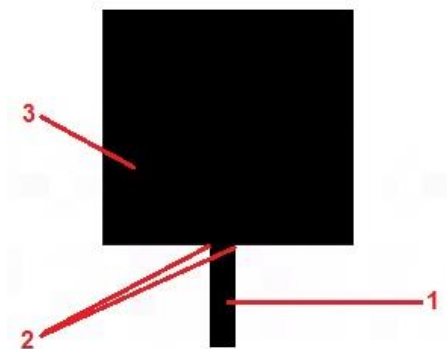


Abb. 4.2: Ausschnitt der Linie 1 des Layouts in Abb. 4.1: 1 – Linie; 2 – Übergangsstelle; 3 – Kontaktfläche.

Zum Verständnis werden einzelne Elemente der Prägestrukturen wie folgend bezeichnet: Die Linien (1) gehen in die Kontaktflächen (3) über und der Bereich dieses Überganges wird die Übergangsstelle (2) genannt (siehe Abb. 4.2).

In Abb. 4.3 bis Abb. 4.6 sind Beispiele der am Leica-Mikroskop mit verschiedenen Objektiven bzw. Vergrößerungen (50-fach und 100-fach) aufgenommenen gravierten Linien dargestellt.

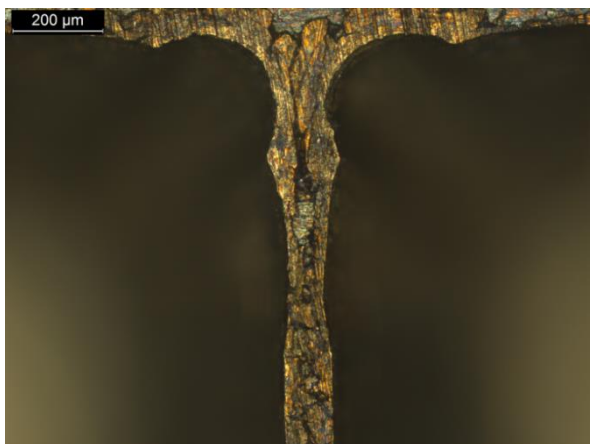


Abb. 4.3: Aufnahme mit dem Leica-Mikroskop der Linie 1 des **Messingprägewerkzeuges** mit 100-facher Vergrößerung.

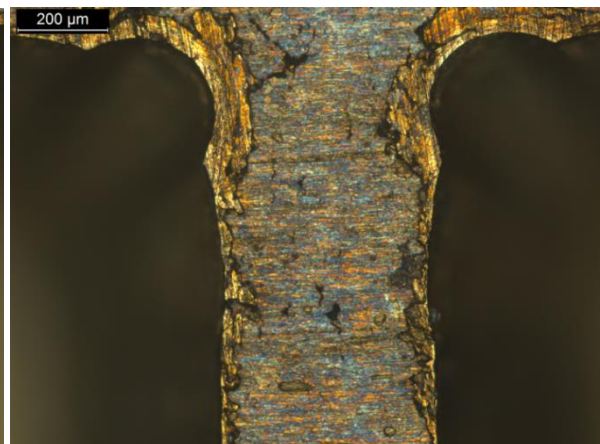


Abb. 4.4: Aufnahme mit dem Leica-Mikroskop der Linie 12 des **Messingprägewerkzeuges** mit 100-facher Vergrößerung.

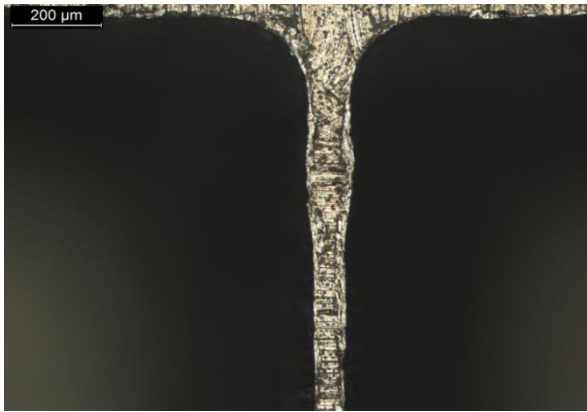


Abb. 4.5: Aufnahme mit dem Leica-Mikroskop der Linie 1 des **Stahlprägewerkzeuges** mit 100-facher Vergrößerung.

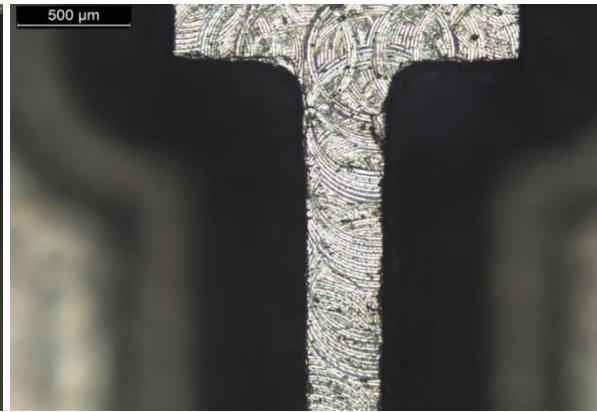


Abb. 4.6: Aufnahme mit dem Leica-Mikroskop der Linie 12 des **Stahlprägewerkzeuges** mit 50-facher Vergrößerung.

An den Übergangsstellen der Linien in die Kontaktfläche (Bezeichnung siehe Abb. 4.2) weisen die Prägestrukturen meistens ungerade Kanten auf (vergleiche Abb. 4.2 mit Abb. 4.3). Dies ist vor allem bei den schmalen Linien mit der Stärke bis 100 µm zu sehen (Abb. 4.3 und Abb. 4.5). Dies ist auf die Herstellungsmethode der Prägewerkzeuge zurückzuführen, da die im Layout vorgegebenen Linien gerade Übergangsstellen haben (siehe Abb. 4.2).

Die breiteren Linien des Messingprägewerkzeuges weisen teilweise auch schlechte Übergangsstellen (Abb. 4.4) auf. Außerdem zeigen die Linien eine durch das Gravieren und die Weiterbearbeitung verursachte Inhomogenität an den Oberflächen (Abb. 4.4 und Abb. 4.6). Dieses ist auf den Sensofar-Aufnahmen in Abb. 4.7 und Abb. 4.8 deutlicher zu sehen.

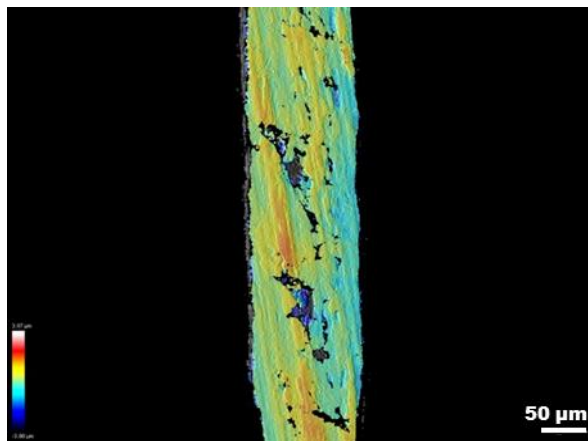


Abb. 4.7: Sensofar-Aufnahme (konfokal) der Linie 1 des **Messingprägewerkzeuges** mit 50-facher Vergrößerung. Der unterste Bereich auf der Skala (linke Ecke): dunkel blau hat den Wert -3,88 µm, der oberste Bereich in weiß 3,97 µm.

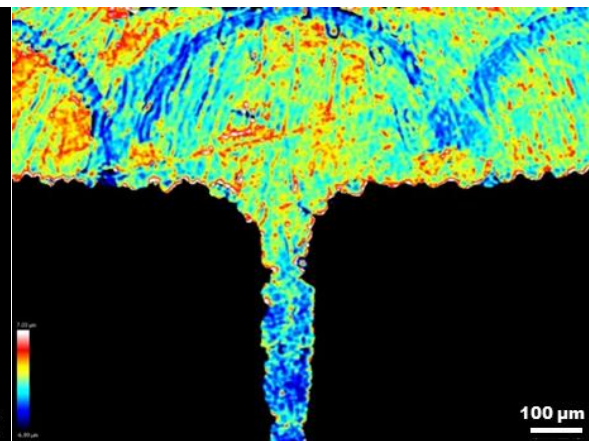


Abb. 4.8: Sensofar-Aufnahme (konfokal) der Linie 1 des **Stahlprägewerkzeuges** mit 10-facher Vergrößerung. Der unterste Bereich auf der Skala (linke Ecke): dunkel blau hat den Wert -6,89 µm, der oberste Bereich in weiß 7,03 µm.

Ein Beispiel des Oberflächenprofils einer Linie des Stahlprägewerkzeuges ist in Abb. 4.9 (mit blau gekennzeichnet) zu sehen. Diese Auswertung erfolgt mit dem Auswertungsprogramm SensoMAP Plus Version 5.1.0.5308 [SEN13]. Dabei sind an einigen Stellen Erhebungen und Senkungen des Profils in Bezug auf das 0-µm-Niveau über 10 µm feststellbar. Mit grau sind

die weiteren Profilschnitte entlang der y-Achse (Achsenbezeichnung siehe Abb. 4.10) des aufgenommenen Abschnitts der Linie 1 des Stahlprägewerkzeuges abgebildet.

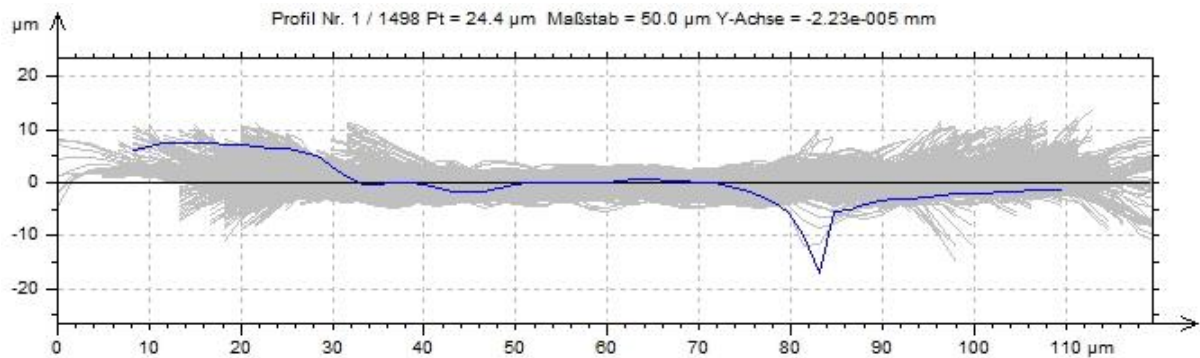


Abb. 4.9: In SensoMAP Plus erzeugtes Profil des mit dem Sensofar aufgenommenen Abschnitts der Linie 1 des **Stahlprägewerkzeuges** ist mit der blauen Linie gekennzeichnet. Mit grau sind die weiteren Profilschnitte entlang der y-Achse des aufgenommenen Abschnitts abgebildet.

Des Weiteren sind die mittleren Oberflächenrauheitswerte R_a für jeweils vier Linien in x-Richtung (Achsenbezeichnung siehe Abb. 4.10) jedes Prägewerkzeuges an zufällig gewählten Stellen in Tabelle 4.3 zusammengefasst.

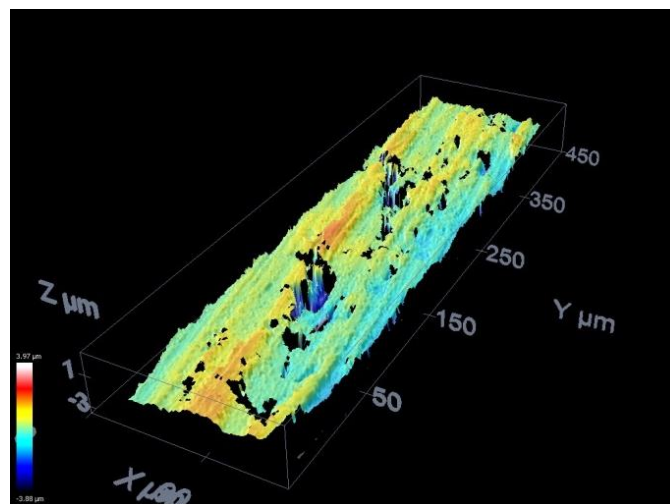


Abb. 4.10: Sensofar-Aufnahme (konfokal) eines Abschnitts der Linie 1 des **Messingprägewerkzeuges** mit 50-facher Vergrößerung. Der unterste Bereich auf der Skala (linke Ecke): dunkel blau hat den Wert $-3,88 \mu\text{m}$, der oberste Bereich in weiß $3,97 \mu\text{m}$.

Tabelle 4.3: Mittlere Rauheit R_a der Prägestrukturoberflächen für jeweils vier Linien der Messing- und Stahlprägewerkzeuge. Die einzelnen Linien sind entsprechend Abb. 4.1 (siehe Seite 43) nummeriert.

#	Mittlere Oberflächenrauheit R_a (Messingprägewerkzeug) [μm]	Mittlere Oberflächenrauheit R_a (Stahlprägewerkzeug) [μm]
Linie 1	2,25	1,39
Linie 5	2,3	2,36
Linie 11	1,37	1,38
Linie 19	1,11	1,08

Die R_a Werte sind die mittels des Sensofar-Auswertungsprogramms SensoMAP Plus gemittelten Messwerte des Messbereichs (nach ISO 4287 [BOS13]). Die Messungen fanden für jede Linie einmalig mit 10- und 50-facher Vergrößerung statt.

4.2.3 Linienstärken der gravierten Prägestrukturen

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden für die beiden Prägewerkzeuge die Prägestrukturgrößen bzw. die Linienstärken aller gravierten Linien bestimmt. Die Länge der Linien und die Größe der Kontaktflächen werden nicht überprüft.

Die Messungen werden senkrecht jeweils an drei Stellen pro Linie mittels des Leica-Auswertungsprogramms Leica Application Suite (LAS) Version 3.7.0 durchgeführt. Der Messbereich bei allen Linien liegt im in Abb. 4.11 markierten Abschnitt und die Messstelle wird jeweils zufällig gewählt. Aus drei Messwerten wird ein Mittelwert berechnet, der als die Linienstärke der gravierten Prägestrukturen der Prägewerkzeuge angenommen wird. Die Messungen finden mit 50- und 100-facher Vergrößerung statt.

Die Messunsicherheit, die durch den Messprozess mit den beiden Objektiven des Leica-Mikroskops entsteht, liegt unter 0,5 %. Sie ist durch fünf Wiederholungsmessungen an ein und derselben Messstelle auf den beiden Prägewerkzeugen bestimmt und berechnet sich als Standardabweichung zum Mittelwert. Die Begriffsdefinition für die Mess- und Prozessunsicherheit wird in dieser Arbeit von [DGQ12, MSA10, VDA10] übernommen. Die Prozessunsicherheit charakterisiert die Ungenauigkeit des Gravierprozesses und kann durch die Kantenrauheit bei den gravierten Prägestrukturen beschrieben werden.

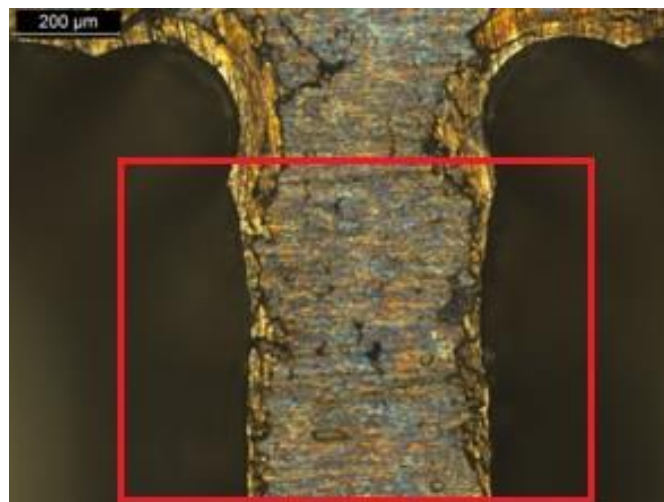


Abb. 4.11: Aufnahme mit dem Leica-Mikroskop der Linie 12 des **Messingprägewerkzeuges** mit 100-facher Vergrößerung. Mit rotem Rahmen ist der Abschnitt, in welchem die Messungen durchgeführt werden, gekennzeichnet.

Für den im Gravierprozess entstehenden Unterschied zwischen im Layout vorgegebenen Linienstärken und tatsächlich gravierten Größen wird an dieser Stelle der Begriff „Linienstärkenzunahme $Z_{pw,Layout}$ “ eingeführt.

Für die auf den Prägewerkzeugen gravierten Linien wird die Linienstärkenzunahme $Z_{pw,Layout}$ folgendermaßen berechnet:

$$Z_{pw,Layout} = \frac{L_{pw} - L_{Layout}}{L_{Layout}} \times 100\%, \quad (4.1)$$

wobei L_{Layout} – die im Layout vorgegebene Stärke der Linie, L_{pw} – die Linienstärke auf dem Prägewerkzeug ist.

Ein absoluter Vergleich zwischen den im Layout vorgegebenen Linienstärken L_{Layout} und den tatsächlich gravierten Werten L_{pw} der beiden Prägewerkzeuge ist in Abb. 4.12 und Abb. 4.13 grafisch dargestellt (Messwerte siehe Anhang 3). Die einzelnen Messpunkte sind für eine bessere Sichtbarkeit mit Linien verbunden.

Beim Vergleich wird festgestellt, dass die gravierten Linien auf den Prägewerkzeugen L_{pw} breiter als im Layout L_{Layout} sind. Dies ist insbesondere beim Messingprägewerkzeug sichtbar. Für die Linien 1-10 (L_{pw} von 10 μm bis 100 μm) verteilen sich die Werte L_{pw} in Bezug auf die L_{Layout} ungleichmäßig. Ab der Linie 11 (L_{pw} von 200 μm bis 1000 μm) liegen die Werte L_{pw} relativ nah zu den im Layout vorgegebenen Linienstärken L_{Layout} .

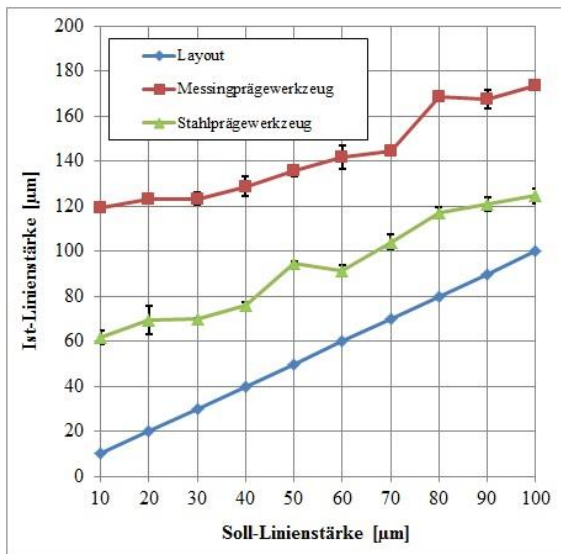


Abb. 4.12: Absoluter Linienstärkenvergleich zwischen dem Layout L_{Layout} und den gravierten Messing- und Stahlprägewerkzeugen L_{pw} für die Linien 1-10 (L_{pw} von 10 μm bis 100 μm). Das Layout ist in Abb. 4.1 (siehe Seite 43) dargestellt.

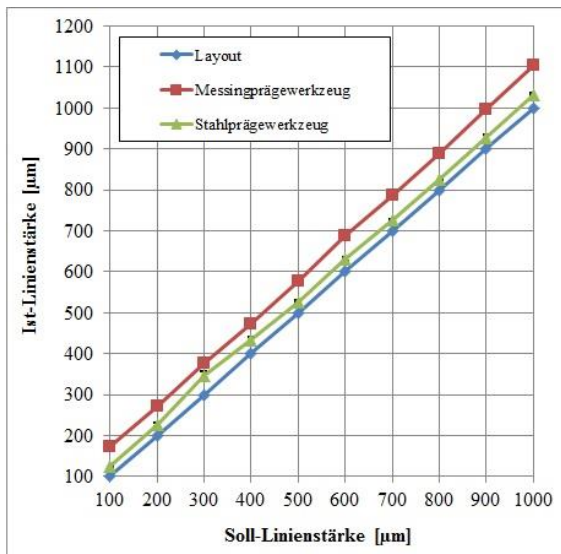


Abb. 4.13: Absoluter Linienstärkenvergleich zwischen dem Layout L_{Layout} und den gravierten Messing- und Stahlprägewerkzeugen L_{pw} für die Linien 10-19 (L_{pw} von 100 μm bis 1000 μm). Das Layout ist in Abb. 4.1 (siehe Seite 43) dargestellt.

Die in Abb. 4.12 und Abb. 4.13 dargestellten Ergebnisse sind in Abb. 4.14 nochmal zusammengefasst. Hier stellen die Linienstärkenzunahmen $Z_{pw,Layout}$ prozentuelle Abweichungen der gemessenen Werte L_{pw} zu den Layoutwerten L_{Layout} dar. Hier sind die einzelnen Werte ebenfalls für die bessere Sichtbarkeit mit Linien verbunden.

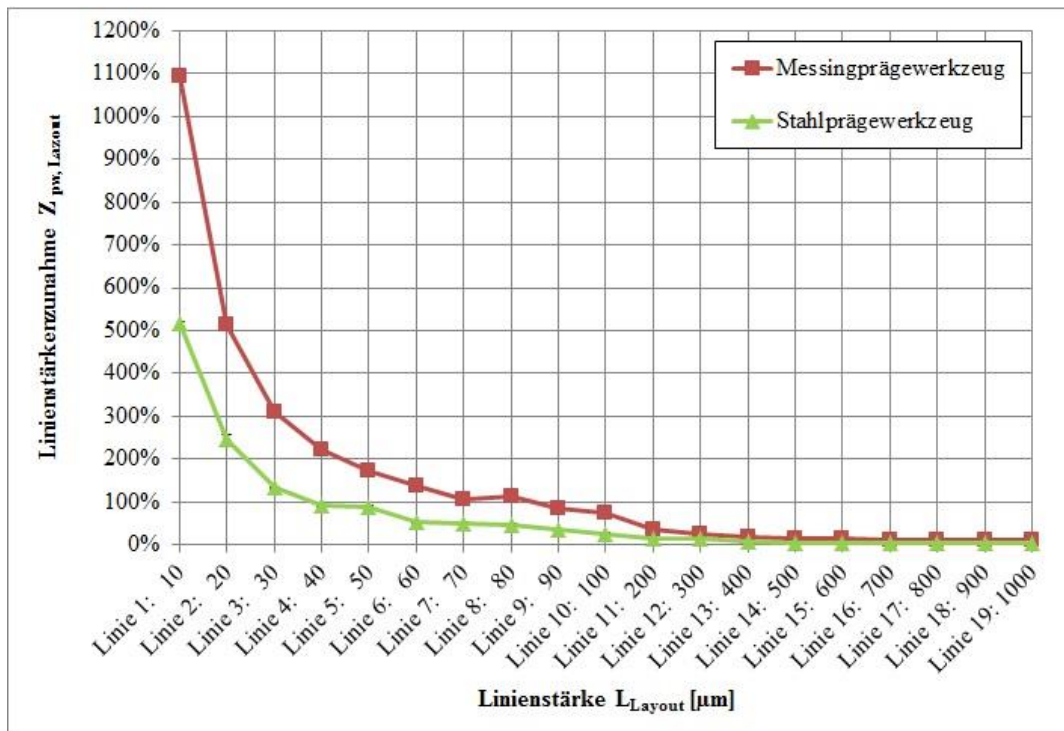


Abb. 4.14: Linienstärkenzunahme $Z_{pw,Layout}$ (nach Gleichung 4.1 auf Seite 48) auf den beiden Prägewerkzeugen in Bezug auf das Layout. Das Layout ist in Abb. 4.1 (siehe Seite 43) dargestellt.

Dabei ist zu sehen, dass die gravierten Linienstärken L_{pw} des Messingprägewerkzeuges bis zu 1096 % von dem vorgegebenen Wert L_{Layout} abweichen. Diese Abweichung sinkt mit der aufsteigenden Linienstärke L_{Layout} . Für das Stahlprägewerkzeug liegt der maximale Wert $Z_{pw,Layout}$ bei 516 % und sinkt ebenfalls mit der Erhöhung des L_{Layout} -Wertes. Ab der Linie 11 verlaufen die aufgezeichneten Kurven synchron.

Die Prozessunsicherheit bei jeweils drei Messwerten jeder Linie, die durch den Gravierprozess des Messingprägewerkzeuges entsteht bzw. die Kantenrauheit der Linien im jeweils gemessenen Bereich charakterisiert, liegt bei 3,2 %. Beim Stahlprägewerkzeug liegt sie bei 8,8 % (die Messunsicherheit ist abgezogen). Sie ist als Standardabweichung in Bezug auf den Mittelwert L_{pw} berechnet (siehe Anhang 3).

4.2.4 Kennlinie zur Kompensation der Linienstärkenzunahme bei Prägewerkzeugen

Eine andere wichtige Erkenntnis ist die Kennlinie zur Kompensation der Linienstärkenzunahme $Z_{pw,Layout}$, die während des Gravierprozesses der Prägewerkzeuge aus Messing und Stahl entstehen kann (Abb. 4.15).

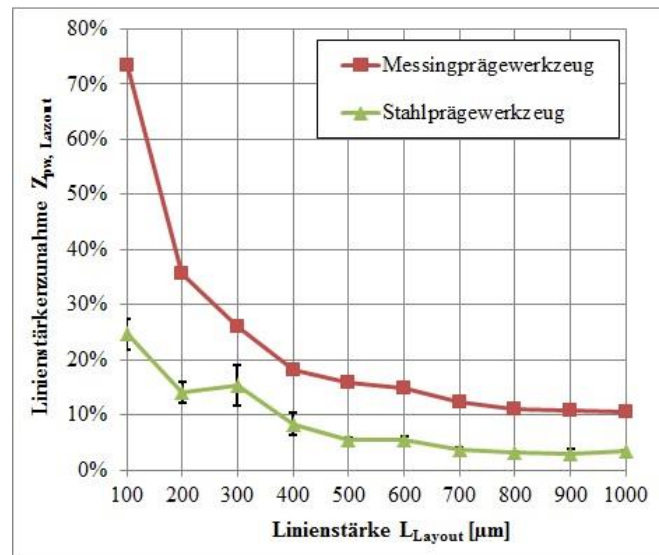


Abb. 4.15: Kennlinie zur Kompensation der Linienstärkenzunahme $Z_{pw,Layout}$ (nach Gleichung 4.1 auf Seite 48) der Prägwerkzeuge aus Messing und Stahl, die durch den Gravierprozess entstehen kann.

Die Ergebnisse sind für die Linienstärkenzunahme $Z_{pw,Layout}$ unter 100 % dargestellt und ab der Linienstärke L_{Layout} von 100 μm anzuwenden. Dabei ist zu erkennen, dass bei dem im Layout vorgegeben Wert L_{Layout} von 100 μm beim Stahlprägwerkzeug eine Linienstärkenzunahme $Z_{pw,Layout}$ durch das Gravieren über 20 % liegt. Die gleiche $Z_{pw,Layout}$ beträgt beim Messingprägwerkzeug 73 %. Weiter sinkt die Linienstärkenzunahme $Z_{pw,Layout}$ der beiden Prägwerkzeuge mit dem steigenden L_{Layout} -Wert. Bei L_{Layout} unter 100 μm ist mit der größeren Linienstärkenzunahme $Z_{pw,Layout}$ zu rechnen und die Grenzen der technischen Machbarkeit beim Gravierprozess zu berücksichtigen.

Die Kennlinie in Abb. 4.15 ist beim Vermessen der einzelnen Prägwerkzeuge im Rahmen dieser Arbeit entstanden und ist nur als Orientierungskennlinie beim Gestalten des Layouts für Prägwerkzeuge zu verstehen.

Eine Kompensation der Linienstärkenzunahmen $Z_{pw,Layout}$ wird für die in dieser Arbeit benutzten Prägwerkzeuge nicht durchgeführt. Diese werden für die im weiteren Verlauf der Arbeit durchzuführenden Prägefoliendruckexperimente benutzt.

4.2.5 Zusammenfassung

Bei der näheren Untersuchung der Prägwerkzeuge im Rahmen dieser Arbeit wurde festgestellt, dass sowohl die Oberflächen der gravierten Prägestrukturen als auch die Konturen einige Qualitätsmängel aufweisen. Diese sind auf den Bearbeitungsprozess der Prägwerkzeuge zurückzuführen und bei der Untersuchung der Prägegüter zu berücksichtigen.

Außerdem weisen die gravierten Prägestrukturen breitere Linienstärken L_{pw} , als es im Layout vorgegeben wurde, auf. Die Linienstärkenzunahme $Z_{pw,Layout}$, welche durch den

Gravierprozess der Prägewerkzeuge entsteht, ist beim Messingprägewerkzeug größer und steigt auf bis zu 1096 % an. Beim Stahlprägewerkzeug liegt diese bei max. 516 % und ist für alle gravierten Linien unter dem entsprechenden Wert für das Messingprägewerkzeug. Mit der Steigerung der Linienstärken im Layout L_{Layout} sinkt der Einfluss des Gravierprozesses auf die Linienstärken L_{pw} ab.

Die Linienstärkenzunahme $Z_{pw,Layout}$, die durch das Gravieren entsteht, ist ebenfalls bei der Untersuchung der Linienstärken der geprägten Linien zu berücksichtigen.

4.3 Prägefolien

4.3.1 Auswahl

Für die Auswahl passender Prägefolien wurde vorab eine Marktanalyse durchgeführt. Dabei konnten 16 Prägefolien von verschiedenen Herstellern in die Untersuchung einbezogen werden (siehe Tabelle 4.4). Die meisten Prägefolien haben Metallschichten aus Aluminium. Die Ausnahmen sind die Prägefolien HS 19-3 (eine echt goldene Prägefolie) und PF100G (vermutlich eine Farbprägefolie mit Grafitgrundschrift).

Zu allen diesen Prägefolien stehen keine weiteren Herstellerinformationen über den genauen Schichtaufbau und die Schichtdicken sowohl einzelner Schichten als auch der gesamten Prägefolien zur Verfügung.

Tabelle 4.4: Übersicht über 16 ausgewählte Prägefolien, ihre Bezeichnung und Hersteller/Vertrieb.

#	<i>Prägefolienbezeichnung</i>	<i>Hersteller/Vertrieb</i>
1	HS 19-3	HS Strambach Neuffer GmbH
2	ALUFIN SH	LEONHARD KURZ Stiftung & Co. KG
3	Baier J 615	Baier GmbH
4	HS 12-110	HS Strambach Neuffer GmbH
5	HS 121-110	HS Strambach Neuffer GmbH
6	Luxor GTS Premium 355	LEONHARD KURZ Stiftung & Co. KG
7	Luxor SH 220	LEONHARD KURZ Stiftung & Co. KG
8	ALUFIN SFX	LEONHARD KURZ Stiftung & Co. KG
9	Baier J 916	Baier GmbH
10	Luxor SFX 220	LEONHARD KURZ Stiftung & Co. KG
11	6110 LC	WS Industrieservice GmbH
12	Baier F-3	Baier GmbH
13	HS 45-110	HS Strambach Neuffer GmbH
14	PF100G	WS Industrieservice GmbH
15	Baier F-5	Baier GmbH
16	Baier C620	Baier GmbH

4.3.1.1 Qualität und elektrischer Flächenwiderstand

Für jede Prägefolie werden die Prozessparameter an der GEBA 6 ermittelt: Soll-Temperatur, Prägezeit und Anpressdruck. Dabei werden die Prägegüter visuell qualitativ beurteilt. Dazu dienen Abb. 4.16 und Abb. 4.17 als Beispiele. In Abhängigkeit von dieser Beurteilung werden die geeigneten Prozessparameter ermittelt (Tabelle 4.5).

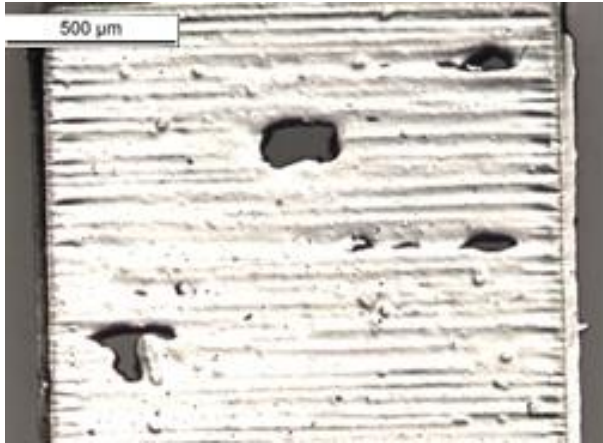


Abb. 4.16: Ein Beispiel des nach visueller Beurteilung schlechten Prägegutes.

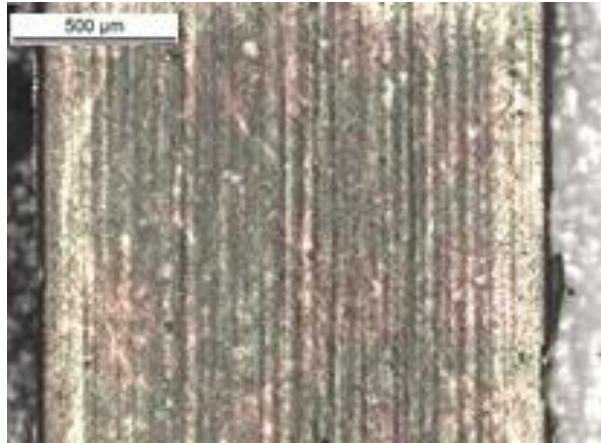


Abb. 4.17: Ein Beispiel des nach visueller Beurteilung guten Prägegutes.

Tabelle 4.5: Prozessparameter an der GEBA 6 für 16 ausgewählten Prägefolien: Soll-Temperatur, Prägezeit und Anpressdruck.

#	Prägefolienbezeichnung	Soll-Temperatur [°C]	Prägezeit [s]	Anpressdruck [kN]
1	HS 19-3	120	1	40
2	ALUFIN SH	130	5	40
3	Baier J 615	130	7	40
4	HS 12-110	140	2	40
5	HS 121-110	130	2	40
6	Luxor GTS Premium 355	100	5	40
7	Luxor SH 220	170	15	40
8	ALUFIN SFX	180	5	40
9	Baier J 916	160	30	40
10	Luxor SFX 220	180	5	40
11	6110 LC	110	15	40
12	Baier F-3	120	3	40
13	HS 45-110	170	15	40
14	PF100G	120	1	40
15	Baier F-5	120	3	40
16	Baier C620	130	5	40

Mit diesen Prozessparametern werden die Prägefolien als vollflächige $2 \times 2 \text{ cm}^2$ Quadrate (wie in Abb. 4.18) mit einem zusätzlichen Stahlprägewerkzeug geprägt.

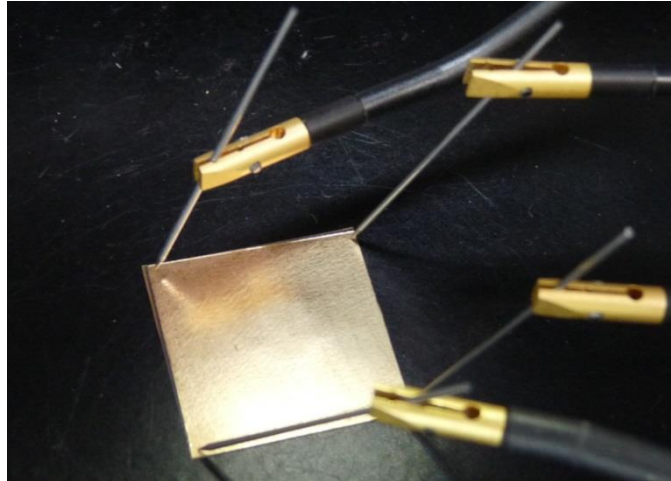


Abb. 4.18: Flächenwiderstandsmessung eines Prägegutes als vollflächiges $2 \times 2 \text{ cm}^2$ Quadrat der goldenen Prägefolie HS 19-3 am 4-Punktmessstand.

Um die elektrische Leitfähigkeit der Prägegüter festzustellen, wird der elektrische Widerstand bestimmt. Dafür wird zuerst die Schutzschicht mit den Resten der Ablöseschicht bei jeder Prägefolie entfernt. Dies wird mittels einer Niederdruck-Plasmaanlage Nano der Firma Diener Electronic [DIE09] durchgeführt [EGI90]. Dabei werden die Prägegüter bei unterschiedlichen Verweilzeiten in der Plasmaanlage geätzt. Währenddessen werden die sich über die Metallisierung befindenden Schichten der Prägefolien nach und nach geätzt, so dass je nach Ätzdauer die Schichten sowohl im nm- als auch im μm -Bereich entfernt werden können.

Der Arbeitsdruck beträgt dabei 0,4 mbar bei 100 %-Leistung der Plasmaanlage. Als Gas wird Sauerstoff verwendet. Der Abstand von der oberen Elektrode zum Prägegut beträgt 14 cm.

Um eine Ätzdauer, bei der in der Plasmaanlage die Schutzschicht mit den Resten der Ablöseschicht vollständig entfernt wird, zu ermitteln, werden die Prägegüter in 10-Minuten-Schritten insgesamt 120 Minuten in der Plasmaanlage geätzt. Nach jedem 10-Minuten-Schritt werden die Prägegüter nach Messmöglichkeit des elektrischen Widerstands überprüft. Als optimale Ätzdauer wird die Zeit festgelegt, bei der die Widerstandswerte stabil sind und einen minimalen Wert haben.

Die Widerstandsmessungen der Prägegüter werden mittels eines 4-Punktmessstands am IDD [IDD12] ermittelt (Messprinzip mit vier Nadeln siehe Abb. 4.18). Das Gerät kann nach dem Verfahren von van der Pauw [VAN58] den spezifischen Widerstand und den Flächenwiderstand einer geschlossenen, nahezu beliebig großen und geformten Schicht bestimmen. Um diese Messungen zu ermöglichen, wurden die Prägegüter absichtlich in Form der Quadrate geprägt, wofür auch das zusätzliche Prägewerkzeug gebraucht wurde.

In Abb. 4.19 und Abb. 4.20 sind die Ergebnisse zu den Flächenwiderstandswerten von zwei Prägefolien in Abhängigkeit von der Dauer des Ätzens in der Plasmaanlage dargestellt. Die Prägefolien sind: HS 19-3 und PF100G. Die Flächenwiderstandswerte sind in 10-Minuten-Schritten innerhalb von 120 Minuten der Ätzdauer aufgetragen. Mit rot ist die optimale Ätzdauer in der Plasmaanlage der jeweiligen Prägefolie gekennzeichnet.

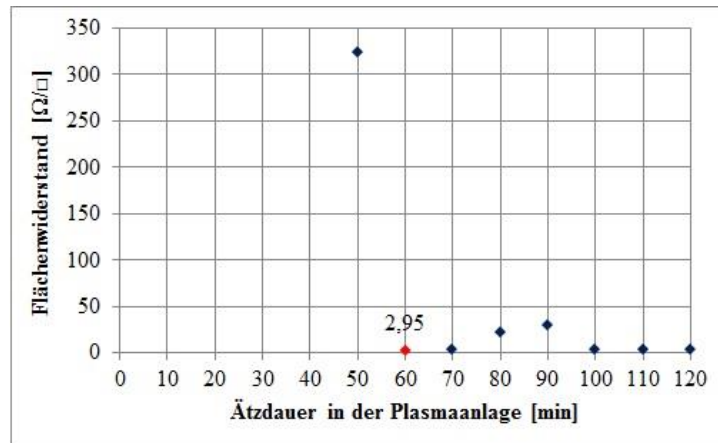


Abb. 4.19: Flächenwiderstandswerte der Prägefolie HS 19-3 beim Ätzen in der Plasmaanlage mit 10-Minuten-Schritten innerhalb von 120 Minuten. Mit rot ist die optimale Ätzdauer in der Plasmaanlage für die Prägefolie gekennzeichnet.

Solange die Schutz- und Ablöseschichten noch relativ dick sind, kann bei den meisten Prägefolien kein Flächenwiderstand ermittelt werden. Sobald diese Schichten wesentlich dünner werden, wird der Flächenwiderstand im $M\Omega/\square$ - und teilweise $k\Omega/\square$ -Bereich gemessen. Die $M\Omega/\square$ -Werte sind in Abb. 4.19 nicht abgebildet.

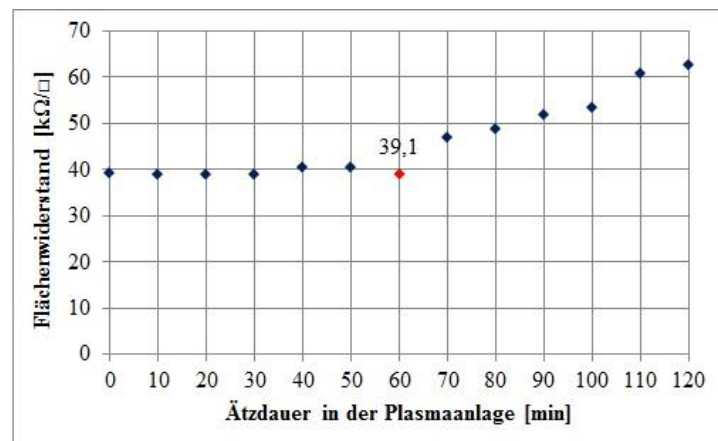


Abb. 4.20: Flächenwiderstandswerte der Prägefolie PF100G beim Ätzen in der Plasmaanlage mit 10-Minuten-Schritten innerhalb von 120 Minuten. Mit rot ist die optimale Ätzdauer in der Plasmaanlage für die Prägefolie gekennzeichnet.

Wenn allerdings das Ätzen zu lange dauert, wird die Metallisierung der Prägefolien teilweise abgetragen, so dass der Flächenwiderstand sich erhöht (siehe Abb. 4.20). Die Ätzdauer, bei der der niedrigste Punkt der Flächenwiderstandswerte am schnellsten erreicht wurde, ist als optimale Ätzdauer für die jeweilige Prägefolie definiert und mit rot in Abb. 4.19 und Abb. 4.20 eingezeichnet.

Eine Übersicht über die optimale Ätzdauer in der Plasmaanlage und die elektrischen Flächenwiderstandswerte nach dieser Ätzdauer für alle 16 untersuchten Prägefolien ist in Tabelle 4.6 aufgeführt. Wie zu sehen ist, verfügen die gewählten Prägefolien über die Flächenwiderstände sowohl in Ω/\square , $k\Omega/\square$, als auch $M\Omega/\square$ -Bereich. Die optimalen Ätzzzeiten in der Plasmaanlage variieren je nach Prägefolie zwischen 20 und 120 Minuten.

Tabelle 4.6: Übersicht über 16 Prägefolien und ihre optimale Ätzdauer in der Plasmaanlage und elektrische Flächenwiderstände.

#	Prägefolienbezeichnung	Optimale Ätzdauer in der Plasmaanlage [min]	Elektrischer Flächenwiderstand [Ω/\square]
1	HS 19-3	60	2,95
2	ALUFIN SH	70	4,73
3	Baier J 615	80	9,45
4	HS 12-110	120	53,77
5	HS 121-110	80	124,40
6	Luxor GTS Premium 355	40	309,97
7	Luxor SH 220	90	316,15
8	ALUFIN SFX	80	413,19
9	Baier J 916	70	1.060,00
10	Luxor SFX 220	80	1.420,00
11	6110 LC	70	1.650,00
12	Baier F-3	80	23.160,00
13	HS 45-110	90	28.660,00
14	PF100G	20	38.800,00
15	Baier F-5	90	> 200.000,00
16	Baier C620	-	> 200.000,00

Die Vorgehensweise dieser Untersuchung und weitere Ergebnisse sind von der Autorin in der Veröffentlichung „Hot stamping technology for functional printing“ [LYA12b] ausführlich beschrieben worden.

4.3.2 Untersuchung der Schichten

Für die Durchführung der Experimente in dieser Arbeit werden zwei in der Praxis gängige Prägefolien ausgewählt. Voraussetzungen dafür sind gute Applizierbarkeit der Prägefolien (visuell beurteilt wie in Abb. 4.16 und Abb. 4.17 auf Seite 52) und messbarer elektrischer Flächenwiderstand der Metallisierung der Prägefolie (nach Tabelle 4.6).

In Betracht kommen die Luxor GTS Premium 355 Aluminium-Prägefolie der Firma LEONHARD KURZ Stiftung & Co. KG [KUR11, KUR12] und eine 22-karat Echtgoldprägefolie HS 19-3 der Firma HS Strambach Neuffer GmbH, die von einem Prägefolienhersteller in den USA produziert wird.

Zwei ausgewählte Prägefolien werden mittels des Rasterelektronenmikroskops JSM 6610LV (Scanning Electron Microscope) [BER14, JEO13] am Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen vor dem Prägefoliendruck genauer untersucht. Es ist wichtig die Qualität der Prägefolienschichten zu überprüfen, um einen Zusammenhang dieses Eingangsparameters mit den im weiteren Verlauf der Arbeit untersuchten Ausgangsparametern zu verfolgen.

In Abb. 4.21 bis Abb. 4.24 sind die REM-Aufnahmen der Klebeschicht und Metallisierung der jeweiligen Prägefolien dargestellt.

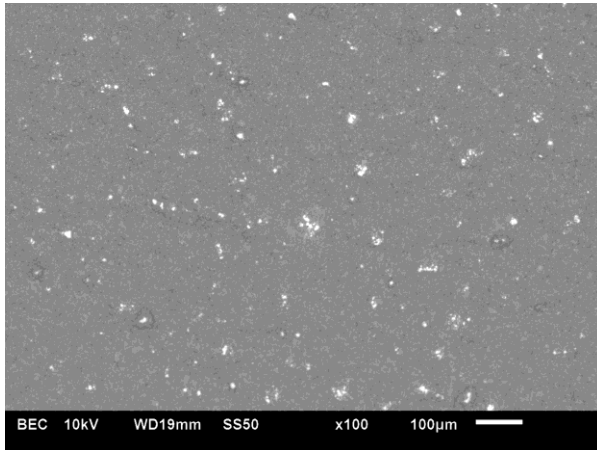


Abb. 4.21: REM-Aufnahme der Klebeschicht der goldenen Prägefolie **HS 19-3**.

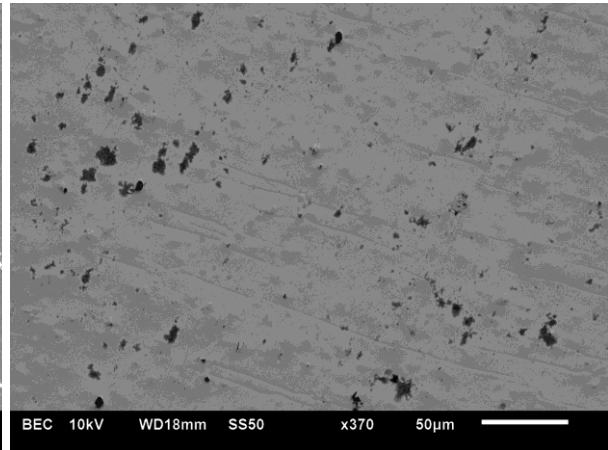


Abb. 4.22: REM-Aufnahme der Goldschicht der goldenen Prägefolie **HS 19-3**.

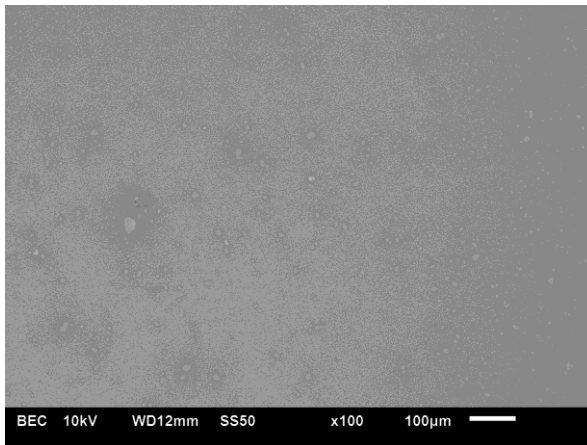


Abb. 4.23: REM-Aufnahme der Klebeschicht der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355**.

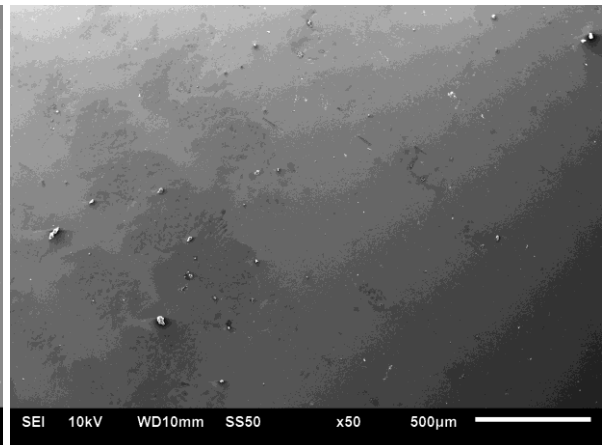


Abb. 4.24: REM-Aufnahme der Aluminiumschicht der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355**.

In Abb. 4.21 kann die Inhomogenität der Klebeschicht bei der goldenen Prägefolie HS 19-3 festgestellt werden. In Abb. 4.22 sind sichtbare Kratzer in der Goldschicht durch das manuelle Abtragen der Klebeschicht entstanden. Diese sind bei der unberührten Prägefolie nicht vorhanden. Beim Ausschließen dieser Kratzer ist die Goldschicht der Prägefolie HS 19-3 homogen aufgetragen.

Die Klebe- und Aluminiumschichten der Prägefolie Luxor GTS Premium 355 weisen eine bessere Qualität auf (Abb. 4.23 und Abb. 4.24). Die kleinen weißen Punkte auf der Metallisierung sind Staubpartikel. Die dunklen Bereiche in Abb. 4.24 sind durch das Anfassen der Prägefolie entstanden.

Die gesamte Prägefoliendicke kann mit einem Materialdickenmessgerät Mitutoyo 156-101 [MIT13a] gemessen werden. Die Prägefoliendicke der Luxor GTS Premium 355 Prägefolie beträgt 23 µm, die der Prägefolie HS 19-3 beträgt 34 µm. Die Dicken der einzelnen Schichten der Prägefolien sind mit der vorhandenen Messtechnik nicht messbar.

4.3.3 Zusammenfassung

Nach einer Marktanalyse und Voruntersuchung der 16 gewählten Prägefolien wurden zwei davon für die weitere Untersuchung und Experimente im Rahmen dieser Arbeit ausgewählt. Als Auswahlkriterium für diese zwei Prägefolien wurden eine gute visuell beurteilte Qualität der Prägegüter und ein messbarer elektrischer Flächenwiderstand im Ω/\square -Bereich festgelegt. Letzterer konnte durch den Abtrag der auf der Metallisierung befindlichen Reste der Ablöseschicht und der Schutzschicht nach dem Verfahren von van der Pauw vermessen werden.

Die zwei Prägefolien Luxor GTS Premium 355 und HS 19-3 wurden im nächsten Schritt mittels des Rasterelektronenmikroskops JSM 6610LV auf die Homogenität der Metallisierung und der Klebeschicht untersucht. Die Untersuchung zeigte keine Ungleichmäßigkeit bei den betrachteten Schichten. Die Ausnahme bildet die Klebeschicht der Prägefolie HS 19-3 mit den gleichmäßig verteilten Fehlstellen des Klebers, die jedoch für die elektrischen Eigenschaften der Prägegüter irrelevant sind. Neben dieser Erkenntnis werden auch die gemessenen Gesamtschichtdicken der Prägefolien im weiteren Verlauf der Arbeit und der folgenden Untersuchung der Ausgangsparameter im betrachteten Prägefoliendrucksystem berücksichtigt.

4.4 Substrat

Das Ziel, Elektronik zu drucken, beinhaltet auch den Aspekt, dass dafür verwendete Substrate flexibel und transparent sein sollen [KLI13]. Aus diesem Grund wird eine 125- μm Polyethylenterephthalat-Folie Hostaphan GN 4600 der Firma Mitsubishi Polyester Film GmbH [MIT13b] als Substrat für die Experimente beim Prägefoliendruck im Rahmen dieser Arbeit verwendet (Spezifikation siehe Anhang 4).

Eine Seite der PET-Folie ist vorbehandelt und hat aufgrund dessen eine geringere Oberflächenenergie (nach Stahl [STA13] $\sigma_D = 46,7 \text{ mN/m}$ und $\sigma_p = 3,4 \text{ mN/m}$, vermessen mit Wasser mit $\sigma_D = 21,8 \text{ mN/m}$ und $\sigma_p = 51 \text{ mN/m}$ und Diiodmethan mit $\sigma_D = 50,8 \text{ mN/m}$ und $\sigma_p = 0 \text{ mN/m}$) als die unbehandelte Seite. Dies erlaubt eine bessere Benetzung der behandelten Seite z. B. beim Bedrucken der PET-Folie [GRI13, MOC04, RIC11]. Eine Untersuchung zu diesem Thema und speziell für diese PET-Folie wurde bereits von Stahl [STA13] veröffentlicht. Weitere Untersuchungen der Eigenschaften von ähnlichen PET-Folien sind auch bei Lack [LAC07] nachzulesen. In den Experimenten, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden, wird die vorbehandelte Seite der PET-Folie benutzt, um bessere Prägeergebnisse zu erzielen.

Außerdem ist die Hostaphan GN 4600 PET-Folie im Vergleich zu anderen Substraten dünn (125 μm), wodurch die unerwünschten Vertiefungen im Substrat während des Prägefoliendruckvorgangs geringer zu erwarten sind.

Aufgrund der niedrigeren Temperaturbeständigkeit der PET-Folie und beim Überschreiten von ca. 150 °C gut zu sehenden Deformationen und Welligkeiten (während der Experimente

mit 16 Prägefolien, siehe Seite 52) wird die Soll-Temperatur an der GEBA 6 bei den Experimenten auf max. 140 °C beschränkt.

4.5 Prägeunterlage

Als Prägeunterlage für den Prägetisch an der GEBA 6 wird eine 6 mm dicke Stahlplatte im Format DIN A4 verwendet.

Diese Entscheidung wird in Bezug auf das für die Arbeit ausgewählte Layout (siehe Abb. 4.1 auf Seite 43) getroffen. Je feiner die Prägestrukturen sind, desto härter soll die Prägeunterlage sein. Diese ist außerdem für eine möglichst flache Übertragung der Prägefolien auf das Substrat wichtig. D. h. es entstehen keine sichtbaren oder spürbaren Vertiefungen im Substrat. Solche Deformationen sind bei elektronischen Bauteilen nicht erwünscht, da es sowohl deren Qualität als auch die elektrischen Eigenschaften beeinflussen kann.

Die Prägeunterlage wird vor den Experimenten an drei zufällig gewählten Messstellen mittels Sensofar Plu Neox und dessen Konfokal-Mikroskopie-Modus mit 10-facher Vergrößerung vermessen, um deren Oberflächenbeschaffenheit zu bestimmen. Eine Sensofar-Aufnahme der Prägeunterlage an einer Messstelle ist in Abb. 4.25 zu sehen.

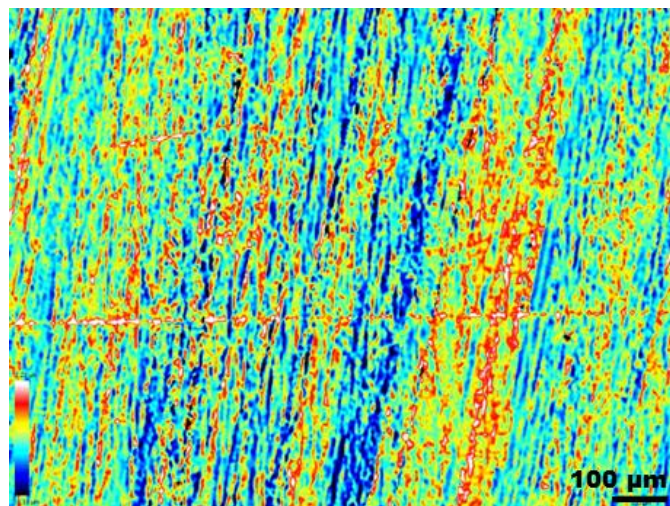


Abb. 4.25: Sensofar-Aufnahme (konfokal) der Prägeunterlage mit 10-facher Vergrößerung. Der unterste Bereich auf der Skala (linke Ecke): dunkel blau hat den Wert -3,18 µm, der oberste Bereich in weiß 3,22 µm.

Die Oberfläche der Prägeunterlage sieht relativ ungleichmäßig aus und weist einige Spuren, die bei der Bearbeitung des Werkstoffs entstanden sind, auf. Die Höheunterschiede liegen bei ca. 6,5 µm (Abb. 4.25) zwischen dem höchsten und dem tiefsten Punkt.

In Abb. 4.26 sind die durch das Auswertungsprogramm SensoMAP Plus erzeugten einzelnen senkrechten Profile (in Abb. 4.25 von oben nach unten betrachtet) der aufgenommenen Messstelle der Prägeunterlage (Abb. 4.25) gezeigt (grauer Bereich). Die blaue Linie bildet den Verlauf eines gemessenen Profils aus. Dabei weisen einzelne Profile Erhöhungen bezogen auf das 0-µm-Niveau in Abb. 4.26 von bis zu 10 µm auf.

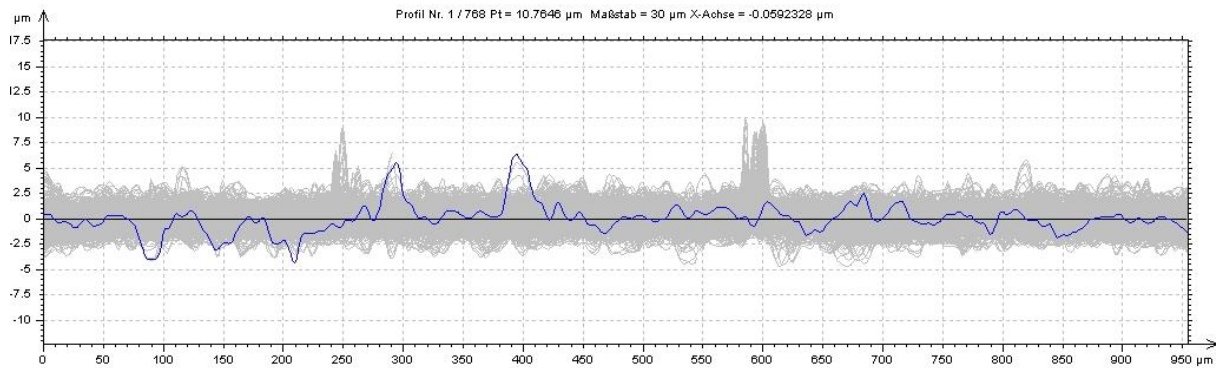


Abb. 4.26: In SensoMAP Plus erzeugtes Profil der mit dem Sensofar aufgenommenen Messstelle der Prägeunterlage ist mit der blauen Linie gekennzeichnet. Mit grau sind die weiteren mehreren Profilschnitte entlang der y-Achse des aufgenommenen Abschnitts abgebildet.

Die Mittelwerte der Oberflächenrauheit R_a an drei unterschiedlichen Messstellen der Prägeunterlage sind in Tabelle 4.7 zusammengefasst.

Tabelle 4.7: Mittlere Rauheit R_a der Prägeunterlageoberfläche für drei Messstellen. Die Werte sind die mittels des Sensofar-Auswertungsprogramms SensoMAP Plus gemittelten Messwerte innerhalb einer zufällig gewählten Messstelle mit 10-facher Vergrößerung.

<i>Messstelle der Prägeunterlage [Nr.]</i>	<i>Mittlere Oberflächenrauheit R_a [μm]</i>
1	0,92
2	0,79
3	0,86

Die mittlere Rauheit R_a der Prägeunterlageoberfläche, die durch drei zufällige Messungen ermittelt wurde, liegt bei 0,86 μm .

Alle diese Erkenntnisse werden bei den Ausgangsparametern berücksichtigt, wobei ein Einfluss auf die Prägeergebnisse aufgrund der geringeren Oberflächenrauheit im Vergleich mit der Schichtdicke der Prägefolien und des Substrats nicht zu erwarten ist. Außerdem ist mit einer geringen Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit der Prägeunterlage aus Stahl während der Prägefoliendruckexperimente durch mechanische Kräfte (Anpressdruck) zu rechnen.

4.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die in Kapitel 3 beschriebenen und für das definierte Prägefoliendrucksystem relevanten Prozessmaterialien genauer untersucht.

Zuerst wurden die Untersuchungsparameter des jeweiligen Prozessmaterials definiert (siehe Tabelle 4.1 auf Seite 41). In weiteren Abschnitten wurde die Entscheidung über die in der Arbeit benutzten Prägewerkzeuge, Prägefolien, das Substrat und die Prägeunterlage getroffen. Schritt für Schritt wurden die gewählten Prozessmaterialien beschrieben und ihre Eigenschaften untersucht.

Die Prägewerkzeuge weisen einige Qualitätsmängel auf. Die Kanten der Prägestrukturen sind je nach Werkstoff unterschiedlich rau und die Oberfläche der erhabenen Stellen zeigt eine

Inhomogenität. Die gemessenen Linienstärken L_{pw} der gravierten Prägestrukturen unterschieden sich ebenfalls von den Werten L_{Layout} , die im Layout vorgegeben wurden, und sind wesentlich breiter. In diesem Zusammenhang wurde im Rahmen dieses Kapitels eine wichtige Erkenntnis über die Kompensation der Linienstärkenzunahme $Z_{pw,Layout}$ (nach Gleichung 4.1 auf Seite 48) bei Prägewerkzeugen, die durch den Gravierprozess entsteht, gewonnen. Diese kann als Orientierungskennlinie beim Prägefoliendruck benutzt werden (siehe Abb. 4.15) und ist bisher in der Literatur nicht auffindbar.

Die ausgewählten Prägefolien Luxor GTS Premium 355 und HS 19-3 weisen einen Flächenwiderstand im Ω/\square -Bereich auf und zeigen relativ gute homogene Klebeschichten und Metallisierungen. Die gesamte Prägefoliendicke der Luxor GTS Premium 355 Prägefolie beträgt 23 μm , die der Prägefolie HS 19-3 beträgt 34 μm .

Aufgrund der Bearbeitungsgrenzen des gewählten Substrats, PET-Folie Hostaphan GN 4600, wird die Soll-Temperatur an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 während der Experimente auf max. 140 °C beschränkt. Allerdings sind geringe Deformationen des Substrats mit der Dicke von 125 μm während des Prägefoliendrucks zu erwarten. Die Prägeunterlage weist einige Bearbeitungsspuren und Ungleichmäßigkeiten der Oberfläche auf. Die mittlere Oberflächenrauheit R_a liegt allerdings unter 1 μm .

Die Ergebnisse der für die Prozessmaterialien durchgeführten Untersuchung werden bei den Ausgangsparametern des Prägefoliendrucksystems berücksichtigt, um einen möglichen Zusammenhang bzw. Einfluss aufeinander festzustellen.

In Kapitel 5 werden weitere Eingangsparameter im betrachteten Prägefoliendrucksystem untersucht. Dazu werden die Prozessparameter, die zum größten Teil an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 einstellbar sind, festgelegt und mittels verschiedener Messtechnik auf die Genauigkeit überprüft.

5. Untersuchung der Eingangsparameter: Prozessparameter

In diesem Kapitel werden die in Kapitel 3 beschriebenen und für das nach Abb. 3.3 (siehe Seite 29) definierte Prägefoliendrucksystem relevanten Prozessparameter an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 untersucht.

Am Anfang werden die zu untersuchenden Prozessparameter festgelegt und ihre Auswahl entsprechend begründet. Im nächsten Schritt werden, in Abhängigkeit von in Kapitel 4 gewählten Prozessmaterialien, die Untersuchungsgrenzen der Prozessparameter gesetzt.

Im Anschluss werden die Ergebnisse diskutiert und daraus folgend Schlussfolgerungen gezogen, die für die weiteren Experimente und Untersuchung der Ausgangsparameter relevant sind und im Rahmen der Arbeit berücksichtigt werden.

Das Ziel der Untersuchung ist Erkenntnisse über die Genauigkeit der Prozessparameter an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 zu erhalten und einen möglichen Einfluss der Eingangsparameter auf die Prägeergebnisse nachvollziehen zu können.

5.1 Festlegung der Eingangsparameter

Nach Tabelle 3.1 (siehe Seite 31) des Kapitels 3 werden die Prozessparameter, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit betrachtet und untersucht werden, festgelegt.

Als Erstes wird einer der wichtigsten Prozessparameter, die Prägetemperatur, an der GEBA 6 untersucht. Das Ziel dabei ist, ihre Übereinstimmung mit dem einstellbaren Soll-Wert zu überprüfen und eine Erkenntnis über ihre Verteilung auf den Prägewerkzeugoberflächen zu erlangen.

Als Zweites wird die Verteilung des Anpressdrucks untersucht, die für die Prägeergebnisse relevant ist. Die Überprüfung des absoluten Werts des Anpressdrucks wird im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt, da diese vom Hersteller bei der Installation der GEBA 6 bereits stattgefunden hat.

Als Eingangsgröße für die Prägezeit wird der an der GEBA 6 voreingestellte Soll-Wert für die Dauer des Prägefoliendruckvorgangs angenommen. Die absolute Prägezeit wird in dieser Arbeit nicht gemessen, allerdings wird deren Wert bei den Prägetemperaturuntersuchungen mitaufgenommen und kann jederzeit nachvollzogen werden.

Die Abkühlzeit wird über den Arbeitsbildschirm der GEBA 6 auf 0 Sekunden gesetzt. Damit wird der Teilprozess III zur Abgrenzung der Untersuchung ausgeschlossen.

Da Abziehwinkel φ_{ab} , -kraft F_{ab} und -zeit maschinenspezifisch und nicht einstellbar sind, werden diese Eingangsparameter ohne zusätzliche Untersuchungen als konstant angenommen. Ihre absoluten Werte sind ebenfalls nicht bekannt. Zu deren Bestimmung ist eine aufwändige Untersuchung notwendig, die im Rahmen der Arbeit nicht stattfindet.

Die zur Untersuchungen des Prägefoliendrucksystems kommenden Prozessparameter sind in Tabelle 5.1 markiert.

Tabelle 5.1: Schematische Darstellung der Eingangsparameter des in Abb. 3.3 (siehe Seite 29) dargestellten Prägefoliendrucksystems. Mit blau sind die untersuchten Eingangsparameter markiert.

<i>Eingangsparameter</i>	
1. Prozessmaterial	2. Prozessparameter
<u>1.1 Prägewerkzeug</u>	<u>2.1 Prägetemperatur</u>
1.1.1 Werkstoff	2.1.1 Physikalische Größe
a) Thermische Eigenschaften	2.1.2 Verteilung auf der Prägewerkzeugoberfläche
b) Mechanische Eigenschaften	
1.1.2 Größe	<u>2.2 Anpressdruck</u>
1.1.3 Dicke	2.2.1 Physikalische Größe
1.1.4 Auflösung des Prägelayouts	2.2.2 Verteilung über die Fläche des Prägewerkzeuges
a) Prägestrukturgröße	
b) Zwischenabstand	<u>2.3 Prägezeit</u>
c) Anzahl Prägestrukturen pro Einheit	2.3.1 Dauer
1.1.5 Kantenrauheit	
1.1.6 Oberflächenbeschaffenheit	<u>2.4 Abkühlzeit</u>
1.1.7 Profil	2.4.1. Dauer
<u>1.2 Prägefolie</u>	<u>2.5 Abziehwinkel</u>
1.2.1 Schichtaufbau	2.5.1 Physikalische Größe
1.2.2 Material einzelner Schichten	
a) Thermische Eigenschaften	<u>2.6 Abziehkraft</u>
b) Mechanische Eigenschaften	2.6.1 Physikalische Größe
c) Chemische Eigenschaften	
d) Rheologische Eigenschaften der Klebeschicht	<u>2.7 Abziehzeit</u>
e) Elektrische Leitfähigkeit der Metallisierung	2.7.1 Dauer
1.2.3 Dicken einzelner Schichten	
1.2.4 Homogenität einzelner Schichten	
1.2.5 Maschinenlaufrichtung	
<u>1.3 Substrat</u>	
1.3.1 Material	
a) Mechanische Beständigkeit	
b) Thermische Beständigkeit	
c) Chemische Beständigkeit	

<i>Eingangsparameter</i>	
1. Prozessmaterial <i>1.3.2 Dicke</i> <i>1.3.3 Oberflächeneigenschaften</i> <u>1.4 Prägeunterlage</u> <i>1.4.1 Schichtaufbau</i> <i>1.4.2 Material einzelner Schichten</i> a) Härte b) Elastische und plastische Eigenschaften c) Thermische Eigenschaften <i>1.4.3 Oberflächenbeschaffenheit</i> <i>1.4.4 Größe</i> <i>1.4.5 Dicke</i>	2. Prozessparameter

5.2 Prägetemperatur

Wie bereits in Abschnitt 2.2.3 beschrieben, wird die Soll-Temperatur an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 über den Arbeitsbildschirm in Grad-Celsius eingegeben. Nachdem die Soll-Temperatur an der GEBA 6 erreicht ist, bleibt die Anzeige des Ist-Werts auf dem Arbeitsbildschirm relativ stabil (auch während und nach einem Prägefoliendruckvorgang) und schwankt um 2-3°C um den Soll-Wert. Dabei wird in der Praxis davon ausgegangen, dass die angezeigte Soll-Temperatur der tatsächlichen Prägetemperatur entspricht.

Um den Prozessparameter Prägetemperatur im untersuchten Prägefoliendrucksystem zu überprüfen und eine Aussage über die tatsächliche Prägetemperatur und ihre Verteilung auf den Prägewerkzeugoberflächen zu treffen, werden an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 Untersuchungen zur Messung der Temperatur während des Aufheizens der Prägeeinheit und während des Prägefoliendruckvorgangs durchgeführt.

5.2.1 Temperatur in der Prägeeinheit während des Aufheizens der Prägewerkzeuge

5.2.1.1 Temperaturmessaufbau „Aufheizen“

Um die Temperaturen in der Prägeeinheit während des Aufheizens nachzuverfolgen, wird ein Temperaturmessaufbau in die Prägeeinheit integriert.

Die Messungen der Temperaturen werden mittels acht eingebauter Thermoelementen des Typs K mit einem Durchmesser von 0,5 mm der Firma Temperatur Messelemente Hettstedt GmbH durchgeführt. Vier davon haben eine Nennlänge von 90 mm, die anderen vier von

170 mm (siehe Anhang 5). Die Genauigkeit dieser Thermoelementen liegt bei $\pm 1,5\text{ °C}$ im Messbereich zwischen -40 °C und $+375\text{ °C}$.

Die Thermoelemente werden vor den Messungen bei zwei unterschiedlichen Temperaturen überprüft und kalibriert: Einmal in einer von der Umgebung isolierten Schachtel im klimatisierten Raum bei 22 °C und einmal auf einer Heizplatte bei 200 °C . Als Referenz wird dabei die Temperatur eines Temperaturmessgeräts testo 735-1 [TES13] mit der Werkskalibrierung genommen. Trotz der Kalibrierung liegt nach einigen Monaten die Abweichung der Messwerte der Thermoelemente untereinander bei $0,3\text{ °C}$. Diese Messunsicherheit ist bei den Ergebnissen zu berücksichtigen.

Zum Einbringen der Thermoelemente werden zehn Nuten mit einer Größe von $0,6\text{ mm} \times 0,6\text{ mm}$ auf der gesamten Breite der Halterplatte gefertigt (Zeichnung siehe Anhang 6). Diese Größe der Nuten ist zur Minimierung der Wärmeverluste durch den Luftspalt zwischen den Thermoelementen und der Halterplatte gewählt. Aus demselben Grund wird zwischen allen Bestandteilen der Prägeeinheit und vor allem in den Nuten ausreichend elektrisch leitfähige Wärmeleitpaste Servisol der Firma CRC Industries UK Ltd. [CRC14] aufgebracht.

Weiter werden die acht Nuten mit den Thermoelementen belegt (Abb. 5.1 und Abb. 5.2). Die Fixierung der Thermoelemente in der Prägeeinheit wird durch ein zusätzliches Teil des Temperaturmessaufbaus erreicht (siehe Nr. 3 in Abb. 5.2 und Zeichnung in Anhang 6).

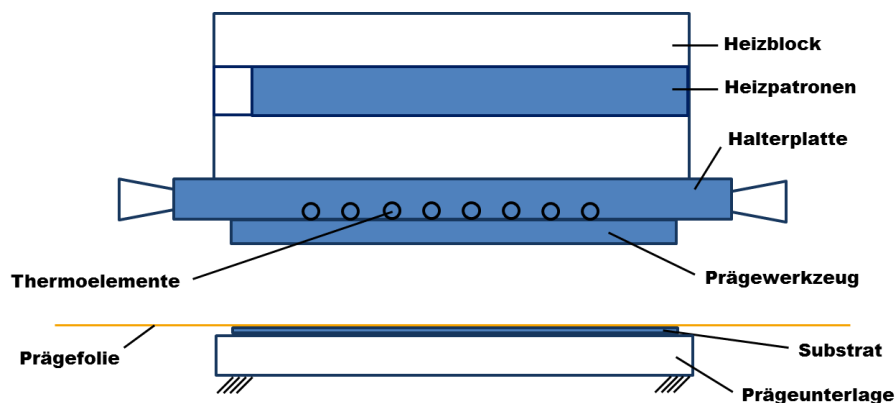


Abb. 5.1: Skizze der Prägeeinheit an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 mit Prägefolie, Substrat und Prägeunterlage. Temperaturmessaufbau „Aufheizen“ mit acht Thermoelementen, die in der Halterplatte eingebaut sind.

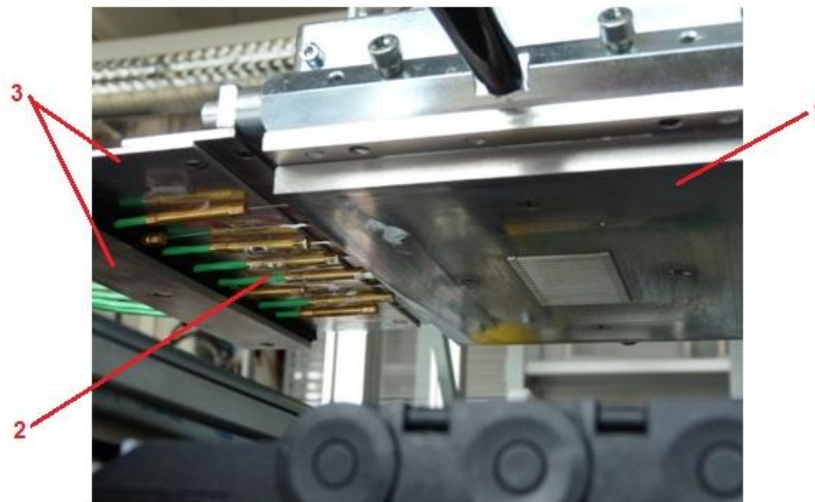


Abb. 5.2: Temperaturmessaufbau „Aufheizen“ in der Prägeeinheit der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6: 1 – Stahlprägewerkzeug; 2 – acht in die Halterplatte eingebaute Thermoelemente; 3 – Halterung für die Thermoelemente.

Alle acht Thermoelemente werden an ein Field-Point-Gerät cFP-2120 der Firma National Instruments [NAT13a] angeschlossen (Abb. 5.3), welches die Regelung, Steuerung, Protokollierung der Messdaten und die Signalverarbeitung von kompatiblen Messsystemen erlaubt [NAT13b].

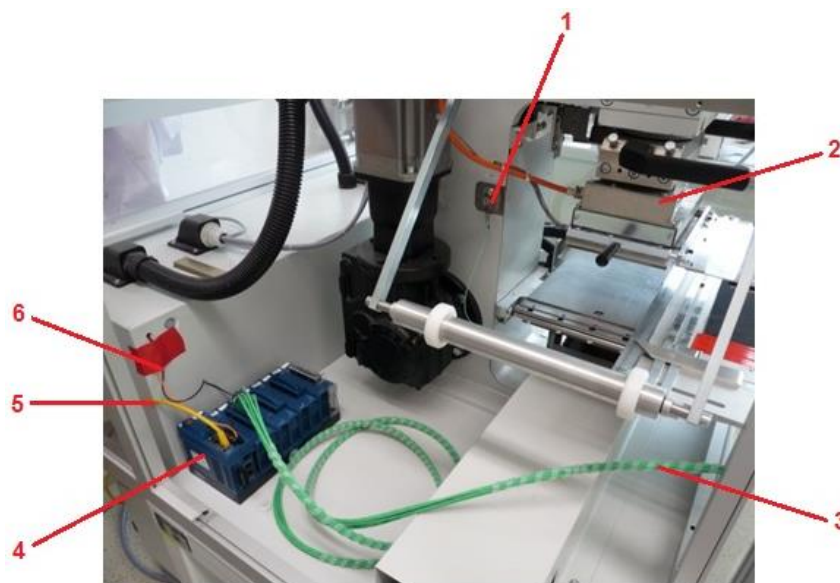


Abb. 5.3: Temperaturmessaufbau in der Prägeeinheit der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6: 1 – einer der Dehnungssensoren 9232A; 2 – Prägeeinheit; 3 – Kabel der acht Thermoelemente an das Field-Point-Gerät; 4 – Field-Point-Gerät; 5 – Netzkabel vom Field-Point-Gerät zum Rechner; 6 – Kabel der Dehnungssensoren 9232A an das Field-Point-Gerät.

Die Messwerte von den Thermoelementen werden als elektrische Spannung vom Field-Point-Gerät alle 500 ms erfasst und in Temperaturwerte umgewandelt. Zur Bestimmung des Anfangspunkts im Prägefoliendruckvorgang werden außerdem die beiden Dehnungssensoren der GEBA 6 (siehe Abschnitt 2.2.4) an das Field-Point-Gerät angeschlossen und deren Spannungsmittelwert mit aufgezeichnet. Gleichzeitig mit den Messwerten der

Thermoelemente wird die Umgebungstemperatur mittels eines im Field-Point-Gerät eingebauten Referenz-Thermometers während der Experimente mit gemessen. Zu beachten ist, dass die Temperatur des Field-Point-Geräts $T_{Referenz}$ je nach seiner Betriebsdauer und die dadurch entstehende Erwärmung von der tatsächlichen Umgebungstemperatur abweichen kann.

Ein Programm, welches die Messwerte des Field-Point-Geräts zusammenfasst, verarbeitet und tabellarisch ausgibt, ist mit LabVIEW Version 12.0f3 [NAT13c] programmiert.

In Abb. 5.4 ist die Skizze der Funktionsweise des Temperaturmessaufbaus an der GEBA 6 abgebildet. Mit dem Stern ist in Abb. 5.4 das LabVIEW-Programm gekennzeichnet, dessen Funktionsweise in Anhang 7 schematisch genauer dargestellt ist.

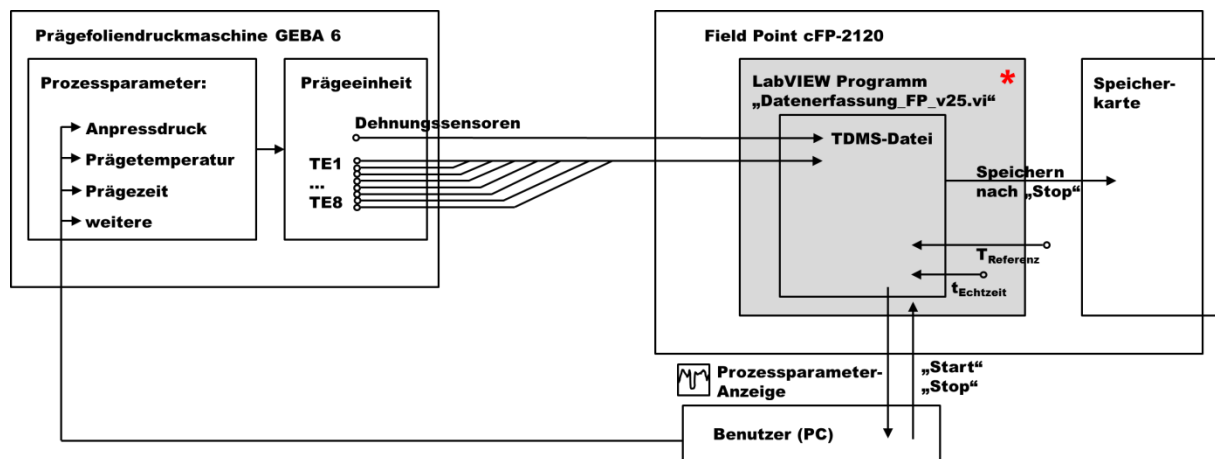


Abb. 5.4: Skizze der Funktionsweise des Temperaturmessaufbaus an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6. Die Werte der Dehnungssensoren, acht Thermoelemente (TE1 bis TE8) und des Referenz-Thermometers $T_{Referenz}$ werden durch das Field-Point-Gerät eingelesen und durch das LabVIEW-Programm verarbeitet und unter aktueller Zeit $t_{Echtzeit}$ und Datum auf einer Speicherkarte gespeichert. Die Werte können in einer TDMS-Datei ausgelesen und ausgewertet werden.

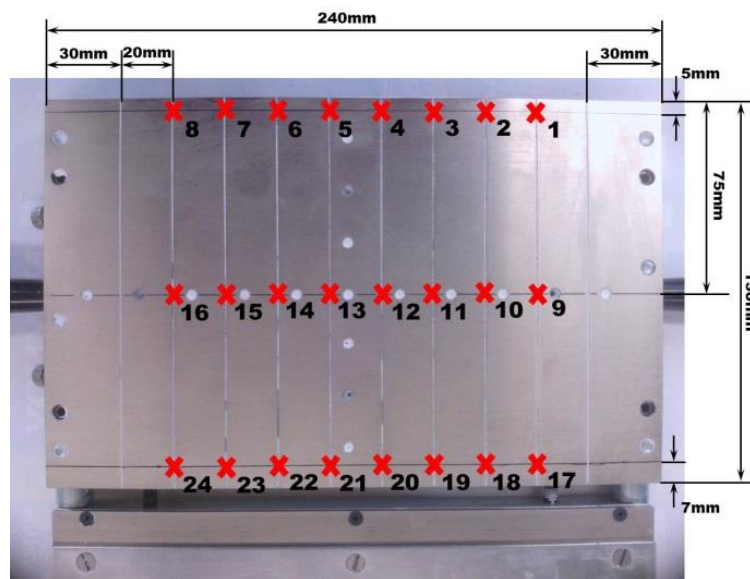


Abb. 5.5: Halterplatte mit acht benutzten Nuten für die Thermoelemente. Sie verlaufen senkrecht durch die Punkte 1/9/17 usw. Die möglichen Positionen für die Fühler der Thermoelemente sind mit den Kreuzen gekennzeichnet und durchnummeriert.

Mit dem Starten des LabVIEW-Programms werden die Messwerte mit aktueller Messzeit t_{Echtzeit} und Datum aufgezeichnet. Mit Beendigung des LabVIEW-Programms wird eine TDMS-Datei, die alle Messwerte, die nachfolgend abgerufen und ausgewertet werden können, beinhaltet, auf der Speicherkarte des Field-Point-Geräts gespeichert.

Für die Thermoelemente werden in den acht benutzten Nuten auf der Halterplatte 24 Positionen definiert. Acht davon liegen im oberen Bereich der Halterplatte (bei vertikaler Betrachtung der Halterplatte), acht – mittig und acht Punkte im unteren Bereich (Abb. 5.5).

Die Spitzen der acht Thermoelemente, in welchen sich die Fühler befinden (siehe Abb. 5.6), werden an acht Positionen positioniert, wobei jeder der drei Bereiche abgemessen wird.

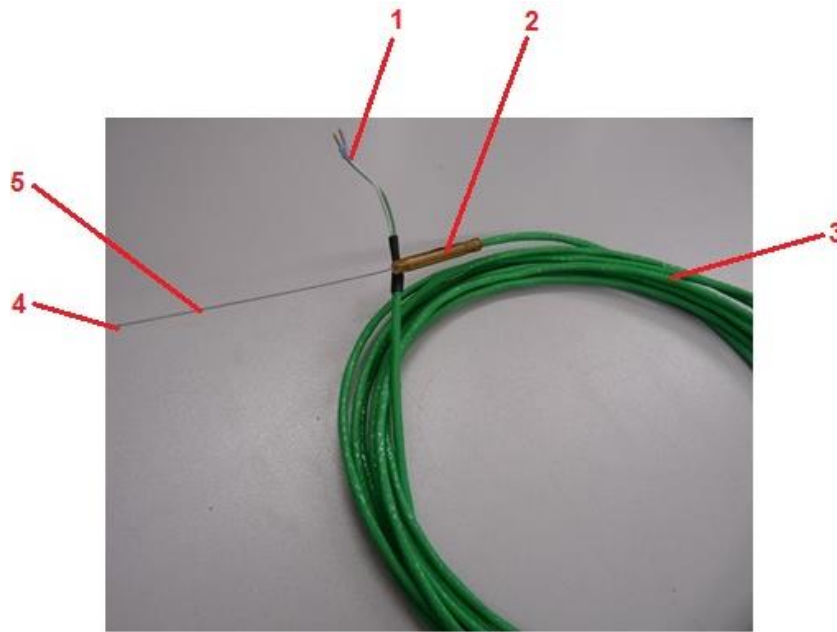


Abb. 5.6: Thermoelement des Typs K mit einem Durchmesser von 0,5 mm und Nennlänge von 90 mm der Firma Temperatur Messelemente Hettstedt GmbH [TMH13]: 1 – freie Kabelenden; 2 – Kabelübergangshülse; 3 – Kabel; 4 – Fühler; 5 – Thermodraht (siehe Anhang 5).

Die Fühler der mittigen Thermoelemente befinden sich zur besseren Kontrolle des Prägebereichs genau oberhalb der gravierten Prägestrukturen der Prägewerkzeuge (Positionen 11, 12, 13, 14 in Abb. 5.7). Die Fühler der anderen vier Thermoelemente werden in die Positionen 1, 18, 7 und 24 gebracht (Abb. 5.7).

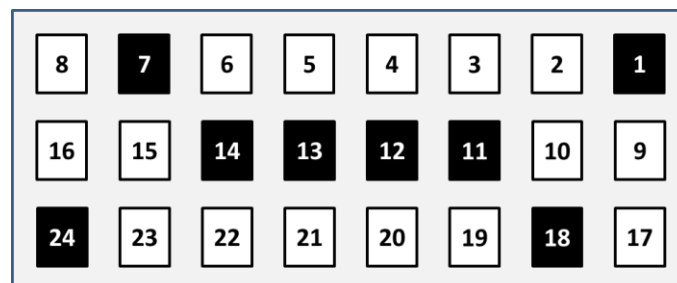


Abb. 5.7: Schema der Halterplatte mit den möglichen durchnummerierten Positionen für die Fühler der Thermoelemente. Schwarz sind die von den acht Thermoelementen besetzten Positionen, weiß – die von den Thermoelementen nicht besetzten Positionen gekennzeichnet.

Dabei ist folgendes zu beachten: Ist die Halterplatte mit dem Prägewerkzeug in der Prägeeinheit eingesetzt, so ist sie bezogen auf Abb. 5.5 und Abb. 5.7 um 180 ° um die Achse der kurzen Seite der Halterplatte gedreht, so dass die Nummerierung aus Sicht des Bedieners von links hinten mit Thermoelement in Position 1 beginnt.

5.2.1.2 Messungen

Mit der gewählten Positionierung der Thermoelemente in der Halterplatte (siehe Abb. 5.5 und Abb. 5.7) werden mehrere, für beide Prägewerkzeuge (Messing und Stahl), identische Messungen durchgeführt. Untersucht wird die Temperatur beim Aufheizen der Prägewerkzeuge auf verschiedene Soll-Temperaturen.

Als Erstes werden die beiden Prägewerkzeuge von ihrer ursprünglichen Umgebungstemperatur auf die Soll-Temperatur von 100 °C aufgeheizt. Die Umgebungstemperatur, die während der Messungen durch die Aufzeichnung der Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts protokolliert wird, wird in den Diagrammen nicht dargestellt.

Als zweites werden nach dem gleichem Prinzip die Messungen mit den weiteren Soll-Temperaturen durchgeführt. Die Prägewerkzeuge werden von 100 °C auf 110 °C, von 110 °C auf 120 °C und so weiter in 10 °C-Schritten bis 140 °C aufgeheizt.

5.2.1.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Temperaturmessungen für das Aufheizen der Prägewerkzeuge von der Umgebungstemperatur auf die Soll-Temperatur von 100 °C sind für das Messingprägewerkzeug in Abb. 5.8 und für das Stahlprägewerkzeug in Abb. 5.9 zu sehen. Die acht Thermoelemente befinden sich in den Nuten der Halterplatte entsprechend Abb. 5.7.

Aus den Diagrammen geht hervor, dass für das Aufheizen aller Bestandteile der Prägeeinheit von der Umgebungstemperatur in den ersten Minuten deutlich mehr Wärme erzeugt wird und die gemessenen Temperaturen die Soll-Temperatur von 100 °C überschreiten: Beim Messingprägewerkzeug steigen die Temperaturen bis max. 113 °C, beim Stahlprägewerkzeug – bis max. 112,5 °C.

Das Aufheizen dauert für das Messingprägewerkzeug ca. 8,5 Minuten, für das Stahlprägewerkzeug – ca. 10,5 Minuten. Anschließend ist aus den Verläufen erkennbar, dass die Temperaturen unter den Soll-Wert von 100 °C fallen und sich nach 32 Minuten des Betriebs beim Messingprägewerkzeug und nach 34 Minuten beim Stahlprägewerkzeug zwischen 85 °C und 89 °C einpendeln.

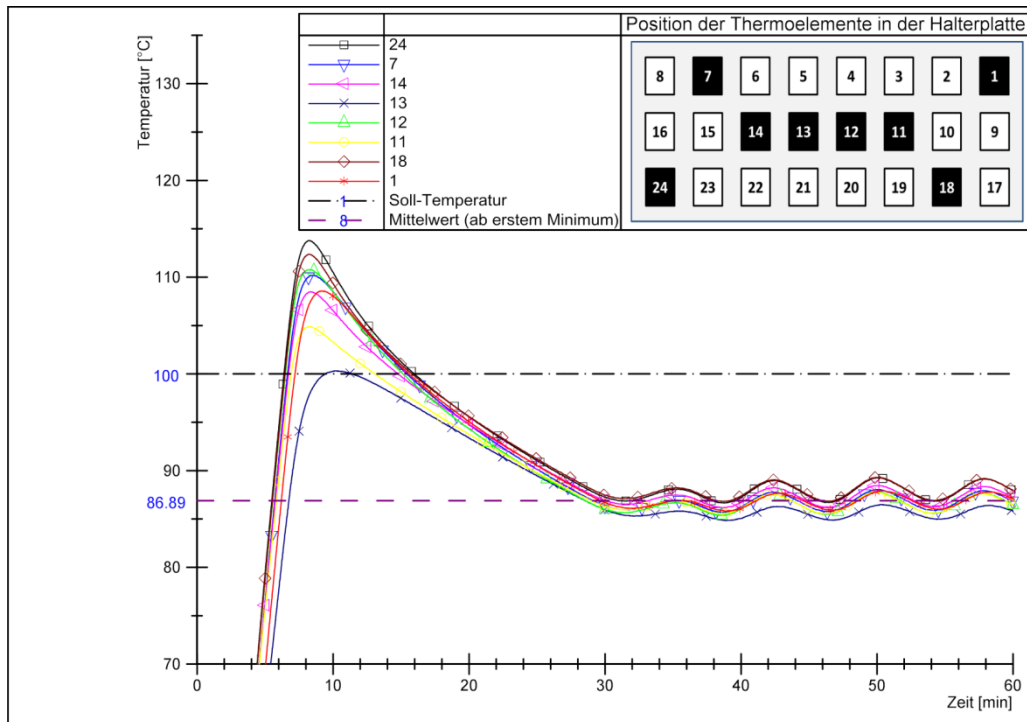


Abb. 5.8: Temperatur in der Halterplatte mit dem eingesetzten **Messingprägewerkzeug** beim Aufheizen der Prägeeinheit auf die Soll-Temperatur von 100 °C. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung. Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt zwischen 25 °C und 27,9 °C.

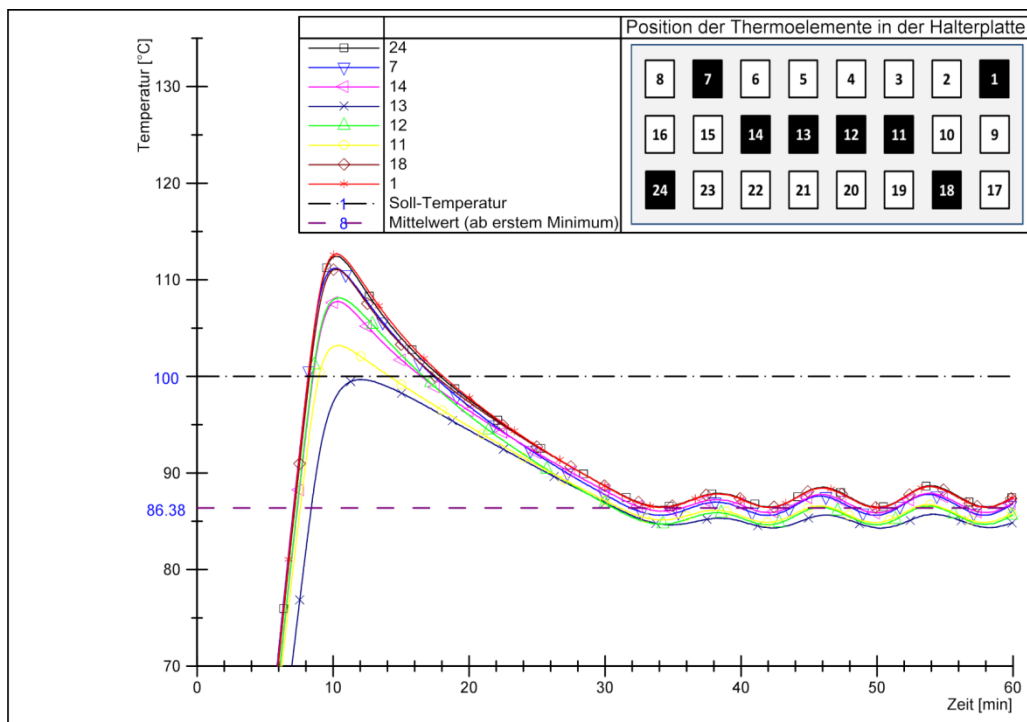


Abb. 5.9: Temperatur in der Halterplatte mit dem eingesetzten **Stahlprägewerkzeug** beim Aufheizen der Prägeeinheit auf die Soll-Temperatur von 100 °C. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung. Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt zwischen 23,7 °C und 25,8 °C.

Sobald die Soll-Temperatur, welche durch die Sensoren Pt100 in der Prägeeinheit kontrolliert wird (siehe Abschnitt 2.2.3), um wenige Grad-Celsius sinkt, wird die Spannung an den Heizpatronen nachgeregelt. Dadurch steigen die Temperaturen in der Prägeeinheit. Dieser Vorgang wiederholt sich in bestimmten Intervallen (im Durchschnitt ca. 4 Minuten) und ist in Abb. 5.8 und in Abb. 5.9 nach ca. 30 Minuten erkennbar.

Die Streuung der über die Fläche verteilten und gemessenen Temperaturen nach dem Durchheizen der Prägeeinheit beträgt max. 2,5 °C für die beiden Prägewerkzeuge. Im Bereich, in welchem sich die gravierten Prägestrukturen befinden (nach Abb. 5.7 auf Seite 67 die Positionen 11, 12 13, 14), liegt die Streuung bei 1,5 °C. Ebenfalls nach dem Einpendeln der Temperaturen schwanken die Temperaturen an einem Messpunkt um bis max. 2,5 °C.

In Abb. 5.10 und Abb. 5.11 sind die Ergebnisse der Temperaturmessungen beim Nachheizen der bereits erwärmten Prägeeinheit von 100 °C auf 110 °C der Soll-Temperatur dargestellt: In Abb. 5.10 für das Messingprägewerkzeug, in Abb. 5.11 für das Stahlprägewerkzeug.

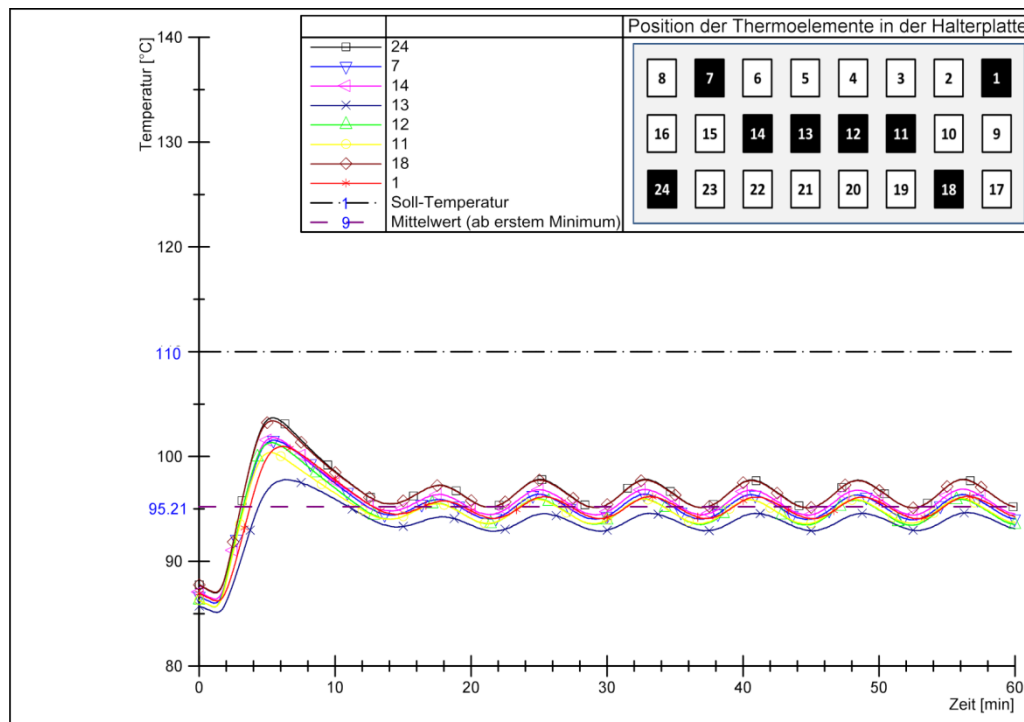


Abb. 5.10: Temperatur in der Halterplatte mit dem eingesetzten **Messingprägewerkzeug** beim Nachheizen der Prägeeinheit von 100 °C auf 110 °C der Soll-Temperatur. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung. Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt zwischen 28 °C und 29,5 °C.

Dabei kann festgestellt werden, dass für das Nachheizen der Prägeeinheit auf die Soll-Temperatur von 110 °C weniger Zeit in Anspruch genommen wird: Beim Messingprägewerkzeug ca. 14 Minuten und beim Stahlprägewerkzeug ca. 20 Minuten, an Stelle von 32-34 Minuten für das Aufheizen von der Umgebungstemperatur (Abb. 5.8 und Abb. 5.9).

Die maximal gemessene Temperatur in der Halterplatte beim Nachheizen erreicht die Soll-Temperatur von 110 °C nicht. Beim Messingprägewerkzeug liegt sie bei max. 103,5 °C, beim Stahlprägewerkzeug – 107,8 °C.

Nach dem Nachheizen pendeln sich die Temperaturen in der Halterplatte in einem Bereich zwischen 93 °C und 97,5 °C ein und werden in diesem Intervall festgehalten. Dies gilt für beide Prägewerkzeuge.

Die Streuung der über die Fläche verteilten und gemessenen Temperaturen nach dem Durchheizen der Prägeeinheit liegt bei max. 3,5 °C für die beiden Prägewerkzeuge. Im Bereich oberhalb der gravierten Prägestrukturen (die Positionen 11, 12 13, 14 nach Abb. 5.7 auf Seite 67) liegt die Streuung nach dem Einpendeln der Temperaturen bei 2,5 °C. An einem einzelnen Messpunkt schwanken die Temperaturen bis max. 3 °C.

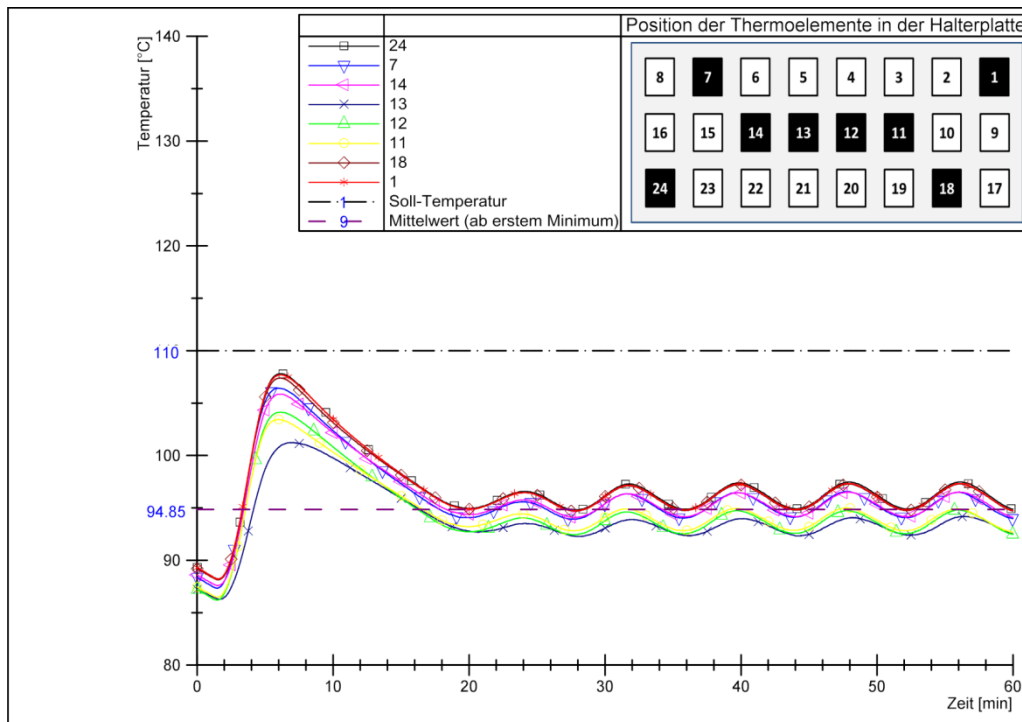


Abb. 5.11: Temperatur in der Halterplatte mit dem eingesetzten **Stahlprägewerkzeug** beim Nachheizen der Prägeeinheit von 100 °C auf 110 °C der Soll-Temperatur. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung. Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt zwischen 26,9 °C und 27,2 °C.

Nach dem gleichem Prinzip werden die Messungen für die weiteren Soll-Temperaturen durchgeführt. Die Prägewerkzeuge werden von 110 °C auf 120 °C und weiter bis 140 °C aufgeheizt. Die Ergebnisse dieser Messreihen siehe Anhang 8.

Im Wesentlichen unterschieden sich diese Ergebnisse von den Ergebnissen beim Nachheizen auf die Soll-Temperatur von 110 °C nicht. Die mit den eingebauten Thermoelementen maximal gemessene Temperatur in der Prägeeinheit erreicht die Soll-Temperatur nicht.

Der Unterschied zwischen den gemessenen Temperaturwerten und Soll-Werten vergrößert sich mit steigender Soll-Temperatur. Bei der Soll-Temperatur von 140 °C ist der Unterschied darüber hinaus bei 20,5 °C. Die Streuung der Temperaturen über die Fläche der Halterplatte erhöht sich ebenfalls.

5.2.1.4 Diskussion und Zusammenfassung

Während des Aufheizens der Prägeeinheit erreichen die Temperaturen in der Halterplatte einen maximalen Wert, welcher sowohl über als auch unter der Soll-Temperatur für die beiden Prägewerkzeuge liegen kann. Das Aufheizen dauert bei dem Stahlprägewerkzeug wenige Minuten länger als bei dem Messingprägewerkzeug. Dies liegt an der geringeren Wärmeleitfähigkeit von Stahl. Ein weiterer, damit verbundener, Effekt ist ebenfalls bei geringeren Werten der maximalen Temperaturen beim Messingprägewerkzeug als beim Stahlprägewerkzeug zu beobachten.

Beim Aufheizen der Prägeeinheit von der Umgebungstemperatur pendeln sich die Temperaturen in der Halterplatte erst nach ca. 35 Minuten des Betriebs ein. Dieser Vorgang ist beim Nachheizen der bereits erwärmten Prägeeinheit auf eine andere Soll-Temperatur wesentlich kürzer und dauert max. 20 Minuten.

Nach dem Einpendeln liegen die gemessenen Temperaturen unter dem eingestellten Soll-Wert. Die Ursache, warum die Thermoelemente nach dem Einpendeln der Temperaturen mindestens 10 °C niedrigere Temperaturen als die Soll-Temperatur messen, kann darin begründet sein, dass die in der Prägeeinheit zur Kontrolle eingebauten Sensoren Pt100 sich näher an den Heizpatronen als die Thermoelemente befinden. Bis die Wärme sich bis zur Halterplatte ausbreitet, gehen einige Grad-Celsius verloren. Der Unterschied zwischen den gemessenen Temperaturwerten und Soll-Werten vergrößert sich mit steigender Soll-Temperatur.

Die Streuung der über die Fläche gemessenen Temperaturwerte in der Halterplatte steigt ebenfalls mit der steigenden Soll-Temperatur und liegt bei der Soll-Temperatur von 100 °C bei ca. 2,5 °C. Genauso erhöht sich die Streuung über die Fläche der gemessenen Temperaturwerte im Bereich oberhalb der gravierten Prägestrukturen der Prägewerkzeuge.

Die Schwankungen der Temperaturwerte an einem einzelnen Messpunkt betragen bis zu 3 °C (Soll-Temperatur von 110 °C) und sind durch die Anwendung des Zweipunkt-Regelungsprinzips bei der Prägetemperatur der GEBA 6 (siehe Abschnitt 2.2.3) begründet.

Der Unterschied in den gemessenen Temperaturen nach dem Einpendeln des Messwertes bei der Nutzung der unterschiedlichen Prägewerkzeuge ist minimal und liegt unter 1 °C.

5.2.2 Temperatur in der Prägeeinheit und der Prägeunterlage während eines Prägefoliendruckvorgangs

5.2.2.1 Temperaturmessaufbau „Prägefoliendruckvorgang“

Da es auch relevant ist, die Temperaturen während und nach einem Prägefoliendruckvorgang nachzuverfolgen, werden Messungen mit den gleichen acht Thermoelementen während der Prägefoliendruckvorgänge durchgeführt. Die Vorgehensweise für die Aufzeichnung der Messwerte bleibt gleich (siehe Abb. 5.4 auf Seite 66), wie in Abschnitt 5.2.1 beschrieben ist. Die Position der Thermoelemente ist allerdings verschieden und in Abb. 5.12 und Abb. 5.13 zu sehen.

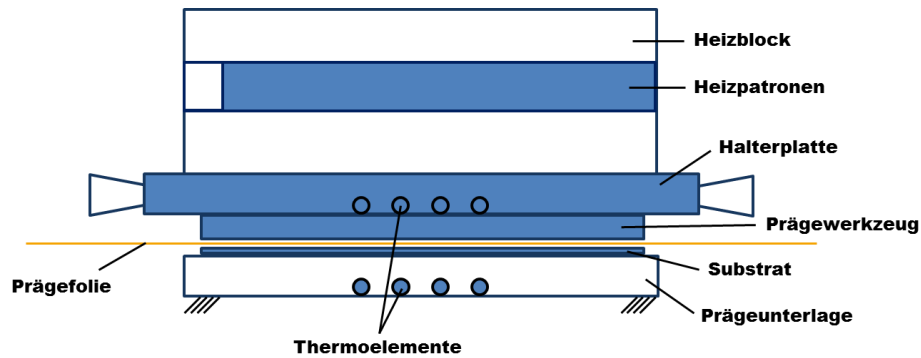


Abb. 5.12: Skizze der Prägeeinheit an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 mit Prägefolie, Substrat und Prägeunterlage. Temperaturmessaufbau „Prägefoliendruckvorgang“: vier Thermoelemente sind in der Halterplatte eingebaut, die anderen vier – in der Prägeunterlage genau oberhalb der ersten vier Thermoelemente.

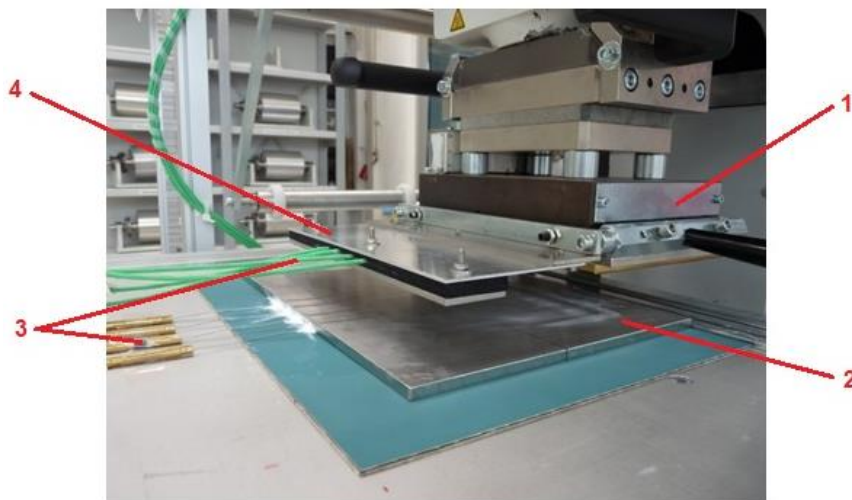


Abb. 5.13: Temperaturmessaufbau „Prägefoliendruckvorgang“ in der Prägeeinheit und der Prägeunterlage der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6: 1 – Prägeeinheit; 2 – Prägeunterlage; 3 – acht in die Halterplatte und Prägeunterlage eingebaute Thermoelemente; 4 – Halterung für die Thermoelemente.

Vier Thermoelemente verbleiben in den Nuten der Halterplatte und befinden sich oberhalb der Prägestrukturen der Prägewerkzeuge in den Positionen 11, 12, 13, 14 (Abb. 5.5 auf Seite 66 und Abb. 5.7 auf Seite 67). Die anderen vier Thermoelemente werden in die vier ähnlich vorgefertigten Nuten der Prägeunterlage eingebracht. Die Fühler der Thermoelemente in der Prägeunterlage werden ebenfalls mittig positioniert (Positionen E, F, G, H in Abb. 5.14 und Abb. 5.15) und befinden sich oberhalb der anderen vier Thermoelemente der Halterplatte mit einer Genauigkeit von 2-3 mm (wenn die Prägeunterlage sich auf dem Prägetisch befindet) (siehe Abb. 5.12 und Abb. 5.13).

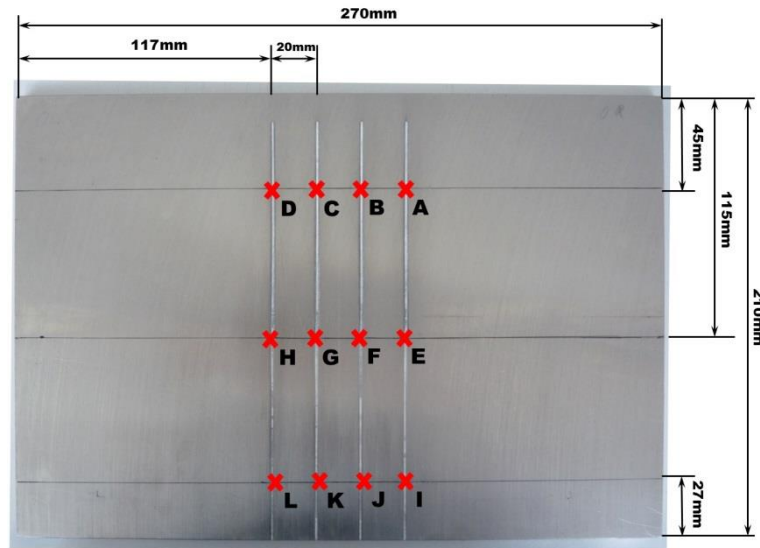


Abb. 5.14: Prägeunterlage mit vier Nuten für die Thermoelemente. Sie verlaufen senkrecht durch die Punkte A/E/I usw. Die möglichen Positionen für die Fühler der Thermoelemente sind mit den Kreuzen und Buchstaben gekennzeichnet.

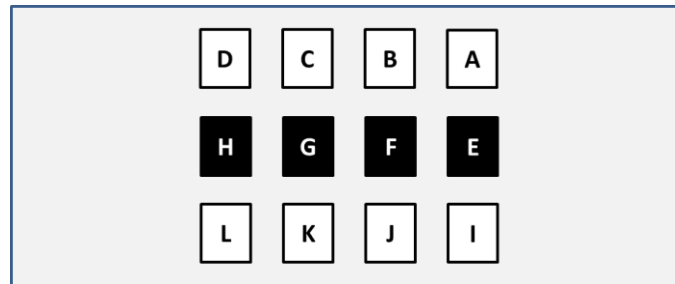


Abb. 5.15: Schema der Prägeunterlage mit den möglichen Positionen für die Fühler der Thermoelemente. Schwarz sind die von den acht Thermoelementen besetzten Positionen, weiß – die von den Thermoelementen nicht besetzten Positionen gekennzeichnet.

Dabei ist folgendes zu beachten: Ist die Prägeunterlage auf dem Prägetisch montiert, so ist sie bezogen auf Abb. 5.14 und Abb. 5.15 um 180° um die Achse der kurzen Seite der Prägeunterlage gedreht, so dass die Nummerierung aus Sicht des Bedieners von links hinten mit Position A beginnt.

Mit dieser Positionierung der Thermoelemente können die Temperaturen nicht nur in der Halterplatte, sondern auch unterhalb der Prägeunterlage nachverfolgt werden. Diese Anordnung ermöglicht ein besseres Verständnis des Temperaturverlaufs während eines Prägefoliendruckvorgangs und dem unmittelbar folgenden Zeitraum.

Ebenfalls, wie beim Temperaturmessaufbau „Aufheizen“, wird zwischen allen Bestandteilen der Prägeeinheit und vor allem in den Nuten der Halterplatte und der Prägeunterlage ausreichend Wärmeleitpaste Servisol aufgebracht, um Wärmeverluste durch möglicherweise entstehende Luftspalte zu minimieren.

5.2.2.2 Messungen

Mit dem Temperaturmessaufbau „Prägefoliendruckvorgang“ (Abb. 5.12 und Abb. 5.13) werden die Temperaturen im Prägefoliendruckvorgang der beiden Prägefolien, Luxor GTS Premium 355 und HS 19-3, jeweils mit jedem Prägewerkzeug gemessen. Zwei der über den Arbeitsbildschirm der GEBA 6 einstellbaren Prozessparameter bleiben konstant: Die Prägetemperatur von 120 °C und der Anpressdruck von 40 kN. Die Prägezeit wird dabei variiert: 2 s, 10 s, 20 s.

Der Moment, in dem das Prägewerkzeug mit der Prägefolie in Kontakt tritt, wird durch die Messwerte des Signals der Dehnungssensoren ermittelt. Die Umgebungstemperatur wird durch das Referenz-Thermometer des Field-Point-Geräts mitaufgezeichnet.

Außerdem werden Messungen der Temperaturen bei mehreren Prägefoliendruckvorgängen nacheinander durchgeführt, um die Temperaturverläufe, die bei einer realen Serienproduktion stattfinden, zu betrachten. Die Prozessparameter bleiben dabei konstant: 120 °C, 40 kN und 2 Sekunden und es werden jeweils fünf Prägefoliendruckvorgänge nacheinander abgewickelt.

Nach den Erkenntnissen des Abschnitts 5.2.1 wird die Prägeeinheit innerhalb von 35 Minuten vor jeder Messreihe auf eine relativ stabile Temperatur durchgeheizt.

5.2.2.3 Ergebnisse

Prägefolie Luxor GTS Premium 355

Die Ergebnisse der Temperaturmessreihen für die Prägefolie Luxor GTS Premium 355 während des Prägefoliendruckvorgangs sind für das Messingprägewerkzeug in Abb. 5.16 und für das Stahlprägewerkzeug in Abb. 5.17 dargestellt.

Wie in Abb. 5.16 beim Messingprägewerkzeug zu sehen ist, wird die Wärme rasch in den ersten Millisekunden des Prägefoliendruckvorgangs von der Prägeeinheit an die Prägefolie, das Substrat und die Prägeunterlage abgegeben. Dadurch sinken die Temperaturen in der Prägeeinheit bzw. in der Halterplatte und steigen in der Prägeunterlage. Solches Absinken der Temperaturen in der Prägeeinheit ist beim Stahlprägewerkzeug nicht zu beobachten.

Kurz nach der Temperaturabsenkung ist eine Temperaturerhöhung in der Halterplatte um max. 3 °C beim Messingprägewerkzeug festzustellen. Beim Stahlprägewerkzeug erhöhen sich die Temperaturen gleichmäßig mit dem Anfang des Prägefoliendruckvorgangs um max. 5 °C. Die erhöhten Temperaturen der beiden Prägewerkzeuge fangen allerdings schon innerhalb von wenigen Sekunden wieder zu sinken an. Das Absinken der Temperaturen in der Halterplatte verläuft beim Messingprägewerkzeug gleichmäßig, wobei beim Stahlprägewerkzeug ein kurzer rascher Temperaturabfall zu beobachten ist.

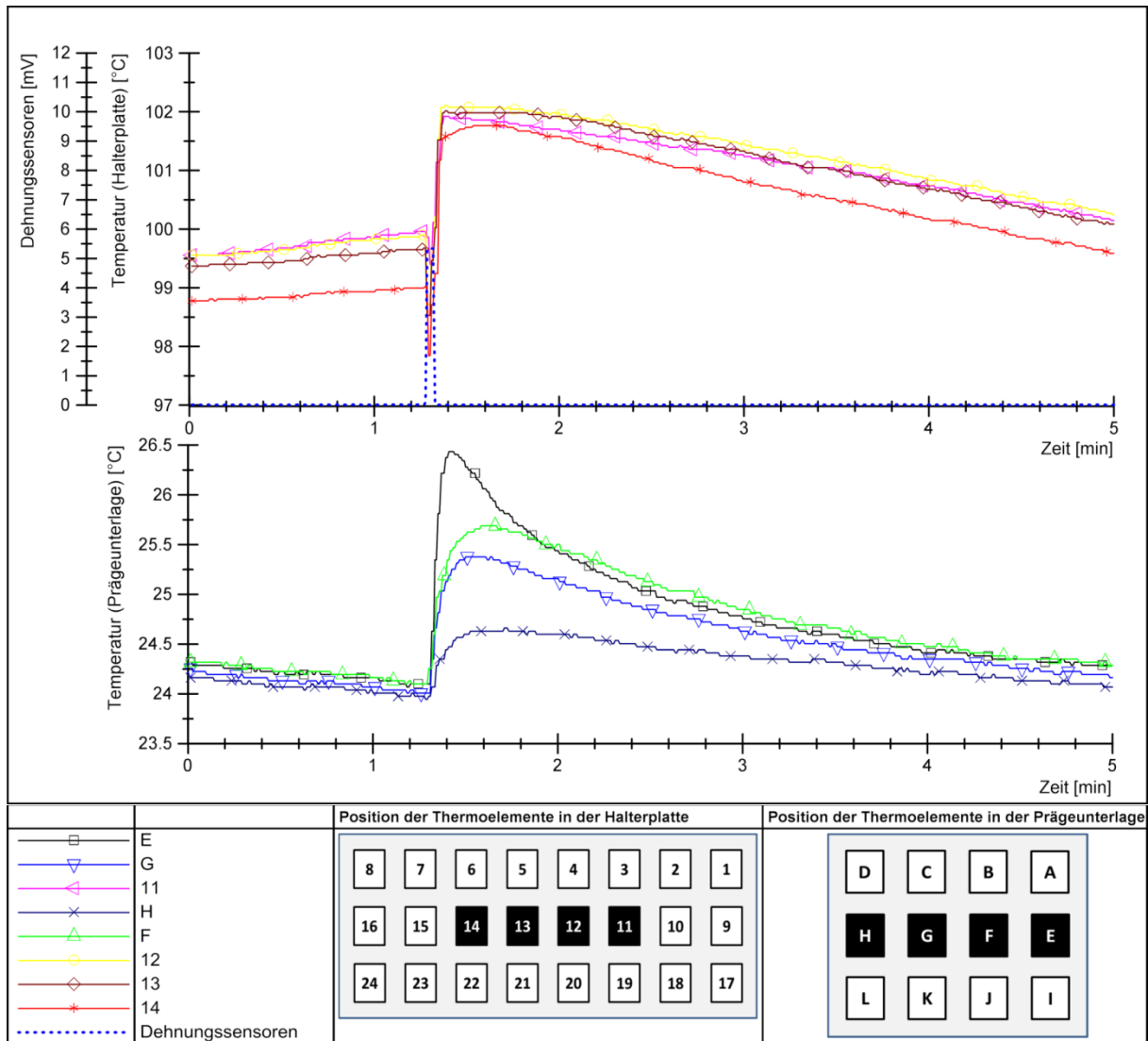


Abb. 5.16: Temperatur in der Halterplatte und in der Prägeunterlage beim Prägefoliendruckvorgang mit der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** und dem **Messingprägewerkzeug**: Soll-Temperatur 120 °C, Anpressdruck 40 kN und Prägezeit 2 Sekunden. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung, in der Prägeunterlage – Abb. 5.15 (siehe Seite 74). Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt zwischen 24,7 °C und 25 °C.

Zeitgleich mit dem Anfang des Prägefoliendruckvorgangs messen die Thermoelemente eine Temperaturerhöhung in der Prägeunterlage. Nach dem Prägefoliendruckvorgang, gleichzeitig mit der Erhöhung der Temperaturen in der Halterplatte, erhöhen sich die Temperaturen in der Prägeunterlage weiter. Mit dem Messingprägewerkzeug erhöhen sich die Temperaturen in der Prägeunterlage um ca. 2,5 °C, bei dem Stahlprägewerkzeug – ca. 1,5 °C.

Innerhalb von wenigen Minuten pendeln sich die Temperaturen sowohl in der Halterplatte als auch in der Prägeunterlage auf den Wert vor dem Prägefoliendruckvorgang ein. Dieser Vorgang dauert ca. 4-5 Minuten.

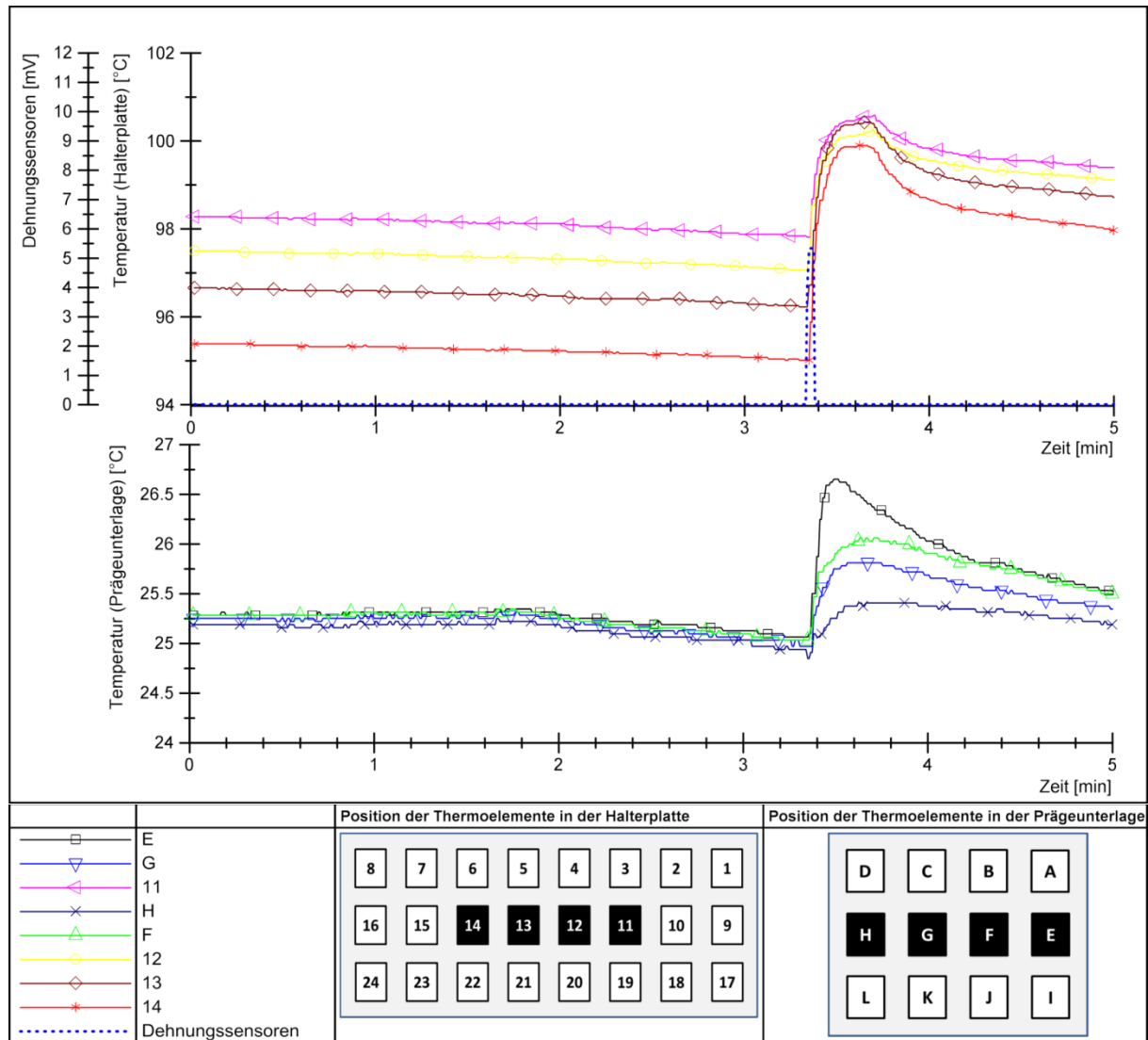


Abb. 5.17: Temperatur in der Halterplatte und in der Prägeunterlage beim Prägefoliendruckvorgang mit der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** und dem **Stahlprägewerkzeug**: Soll-Temperatur 120 °C, Anpressdruck 40 kN und Prägezeit 2 Sekunden. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung, in der Prägeunterlage – Abb. 5.15 (siehe Seite 74). Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt zwischen 26,1 °C und 26,3 °C.

Die beschriebenen Effekte sind besser in den Ergebnissen der Prägefoliendruckvorgänge bei längeren Prägezeiten zu sehen. Die Diagramme für die Prägefolie Luxor GTS Premium 355 bei Prägezeiten von 10 und 20 Sekunden für die beiden Prägewerkzeuge sind in Anhang 9A zu finden. Mit der Erhöhung der Prägezeit steigen die Temperaturen in der Prägeunterlage.

Wenn der zeitlich identische Prägefoliendruckvorgang fünf Mal nacheinander durchgeführt wird, ist ein ähnlicher Temperaturverlauf, wie nur bei einem Prägefoliendruckvorgang, zu beobachten (Abb. 5.18: Messingprägewerkzeug und Abb. 5.19: Stahlprägewerkzeug).

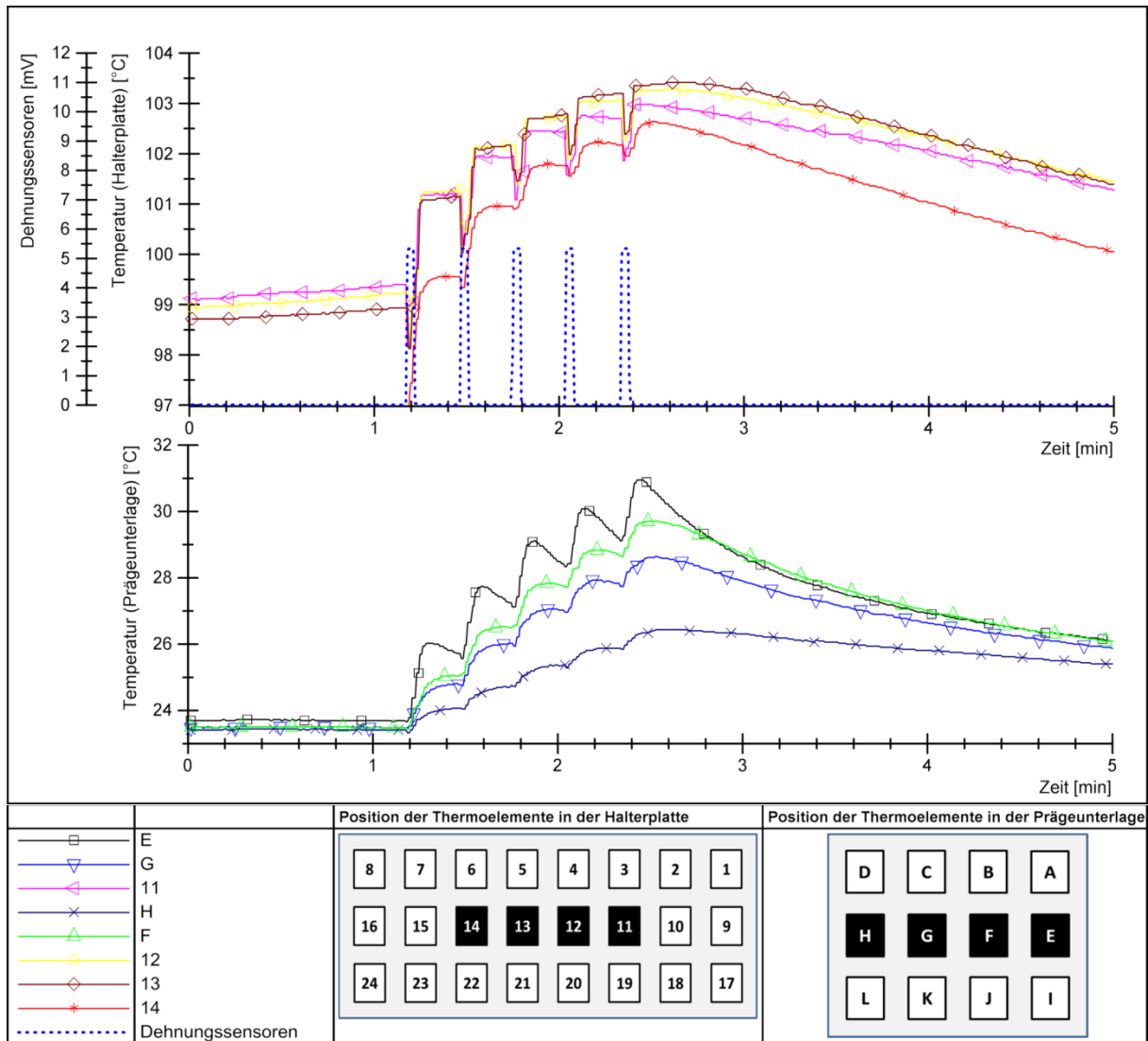


Abb. 5.18: Temperatur in der Halterplatte und in der Prägeunterlage bei fünfmaligem Prägefoliendruckvorgang mit der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** und dem **Messingprägewerkzeug**: Soll-Temperatur 120 °C, Anpressdruck 40 kN und Prägezeit 2 Sekunden. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung, in der Prägeunterlage – Abb. 5.15 (siehe Seite 74). Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt bei 26 °C.

Bei jedem Prägefoliendruckvorgang steigen sowohl die Temperaturen in der Halterplatte (nach einer kurzen Absenkung beim Messingprägewerkzeug), als auch in der Prägeunterlage auf. Danach sinken die während eines Prägefoliendruckvorgangs gestiegenen Temperaturen in der Halterplatte nur so lange bis ein nachfolgender Prägefoliendruckvorgang stattfindet, wobei die Absenkung beim Messingwerkzeug deutlich langsamer verläuft. Insgesamt erhöhen sich diese Temperaturen um max. 5 °C nach den fünf Prägefoliendruckvorgängen mit dem Messingprägewerkzeug und um max. 7 °C mit dem Stahlprägewerkzeug.

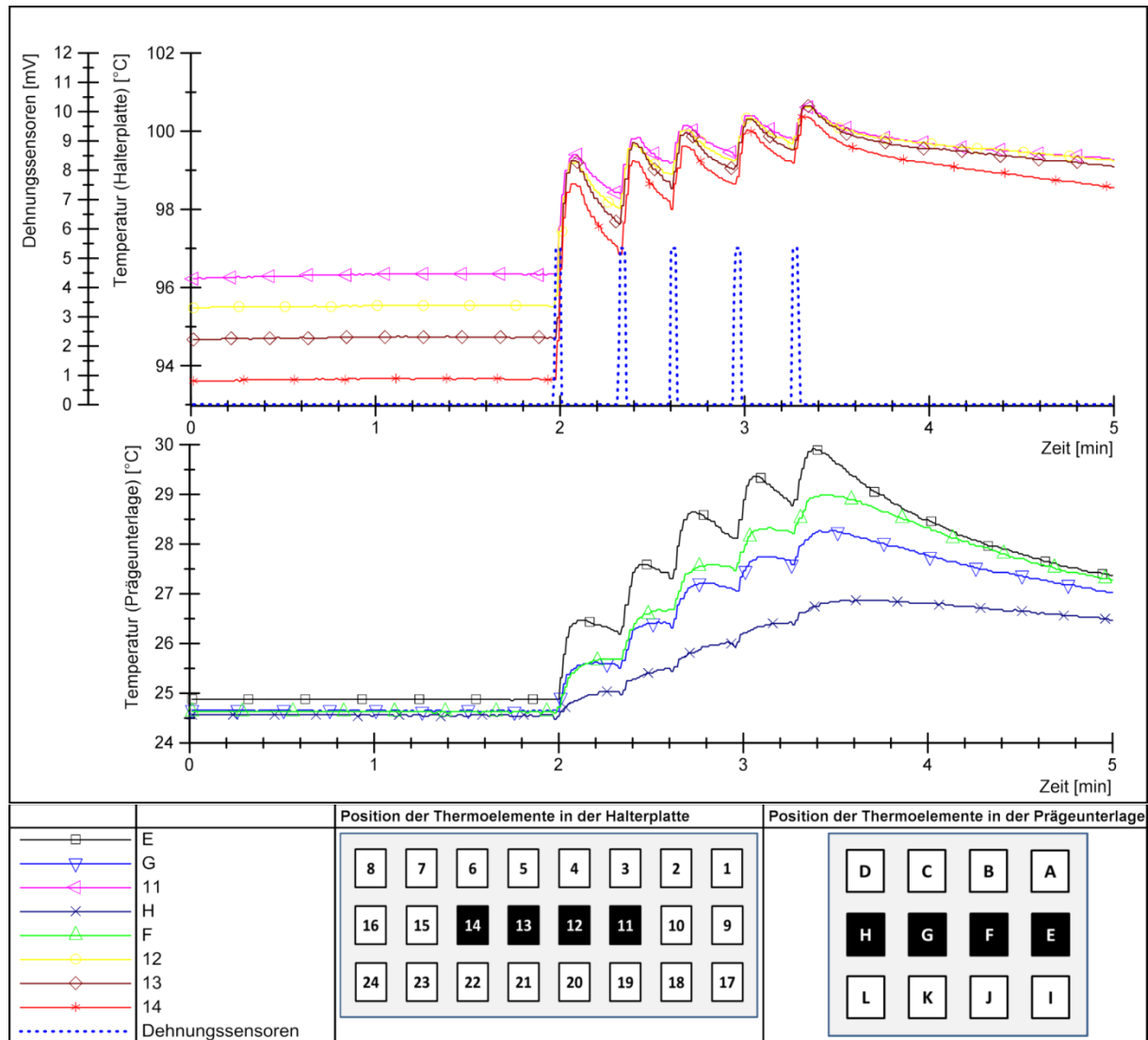


Abb. 5.19: Temperatur in der Halterplatte und in der Prägeunterlage bei fünfmaligem Prägefoliendruckvorgang mit der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** und dem **Stahlprägewerkzeug**: Soll-Temperatur 120 °C, Anpressdruck 40 kN und Prägezeit 2 Sekunden. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung, in der Prägeunterlage – Abb. 5.15 (siehe Seite 74). Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt bei 27 °C.

Genauso, wie nur bei einem Prägefoliendruckvorgang, messen die Thermoelemente gleichzeitig mit dem Anfang des Prägefoliendruckvorgangs eine Temperaturerhöhung in der Prägeunterlage, die noch kurz nach dem Ende des Prägefoliendruckvorgangs stattfindet. Da die weiteren Prägefoliendruckvorgänge gleich im Anschluss zum ersten durchgeführt werden, sinken die Temperaturen in der Prägeunterlage im Durchschnitt nur um 0,5 °C und steigen mit dem Anfang des nächsten Prägefoliendruckvorgangs wieder. Beim Einsatz des Messingprägewerkzeuges erhöhen sich die Temperaturen in der Prägeunterlage um 7,5 °C, bei dem Stahlprägewerkzeug – 5,5 °C. Dies erfolgt nach fünf nacheinander abgewickelten 2-sekündigen Prägefoliendruckvorgängen. Innerhalb von wenigen Minuten nach den Prägefoliendruckvorgängen pendeln sich die Temperaturen sowohl in der Halterplatte als auch in der Prägeunterlage auf den vorherigen Wert ein.

Prägefolie HS 19-3

Die Ergebnisse der Temperaturmessreihen für die Prägefolie HS 19-3 während eines Prägefoliendruckvorgangs mit den beiden Prägewerkzeugen sind in Abb. 5.20 (Messingprägewerkzeug) und Abb. 5.21 (Stahlprägewerkzeug) dargestellt.

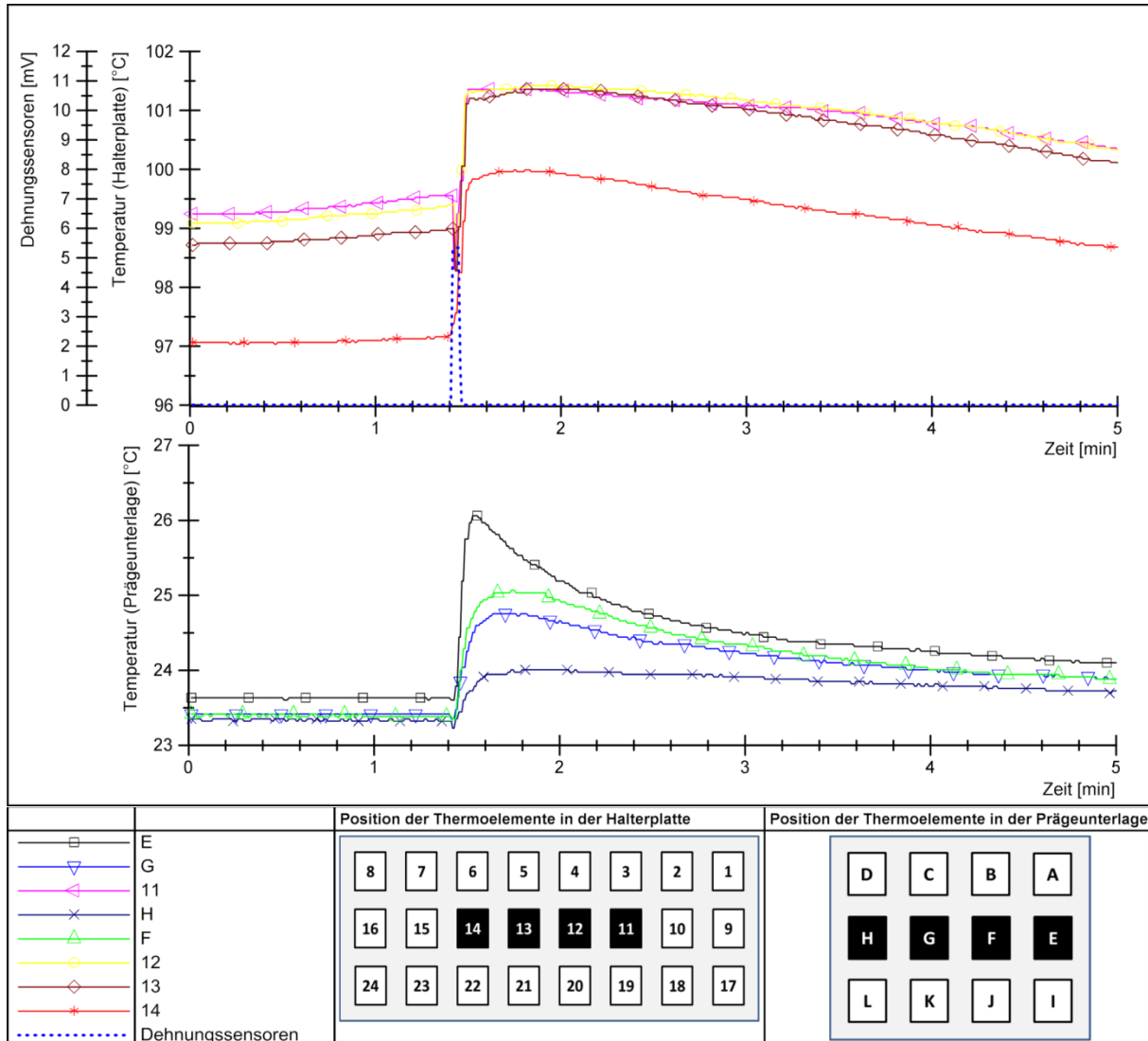


Abb. 5.20: Temperatur in der Halterplatte und in der Prägeunterlage beim Prägefoliendruckvorgang mit der Prägefolie **HS 19-3** und dem **Messingprägewerkzeug**: Soll-Temperatur 120 °C, Anpressdruck 40 kN und Prägezeit 2 Sekunden. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung, in der Prägeunterlage – Abb. 5.15 (siehe Seite 74). Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt bei 26,6 °C.

In Abb. 5.20 beim Messingprägewerkzeug ist zu sehen, dass in den ersten Millisekunden des Prägefoliendruckvorgangs die Temperaturen in der Halterplatte sinken und zeitgleich in der Prägeunterlage steigen. Kurz danach steigen die Temperaturen auch in der Halterplatte. Eine Temperaturerhöhung in der Halterplatte ist um max. 4,5 °C beim Messingprägewerkzeug feststellbar. Beim Stahlprägewerkzeug steigen die Temperaturen zeitgleich mit dem Anfang des Prägefoliendruckvorgangs (ohne kurze Absenkung) und erhöhen sich um max. 5,5 °C. Diese Temperaturen beim Stahlprägewerkzeug fallen allerdings schon innerhalb der nächsten

Sekunden rasch ab. Die Temperatursenkung in der Halterplatte beim Messingprägwerkzeug findet langsamer und innerhalb von einigen Minuten statt.

Beim Messingprägwerkzeug erhöhen sich die Temperaturen in der Prägeunterlage insgesamt um ca. 2,5 °C, bei dem Stahlprägwerkzeug um ca. 2 °C.

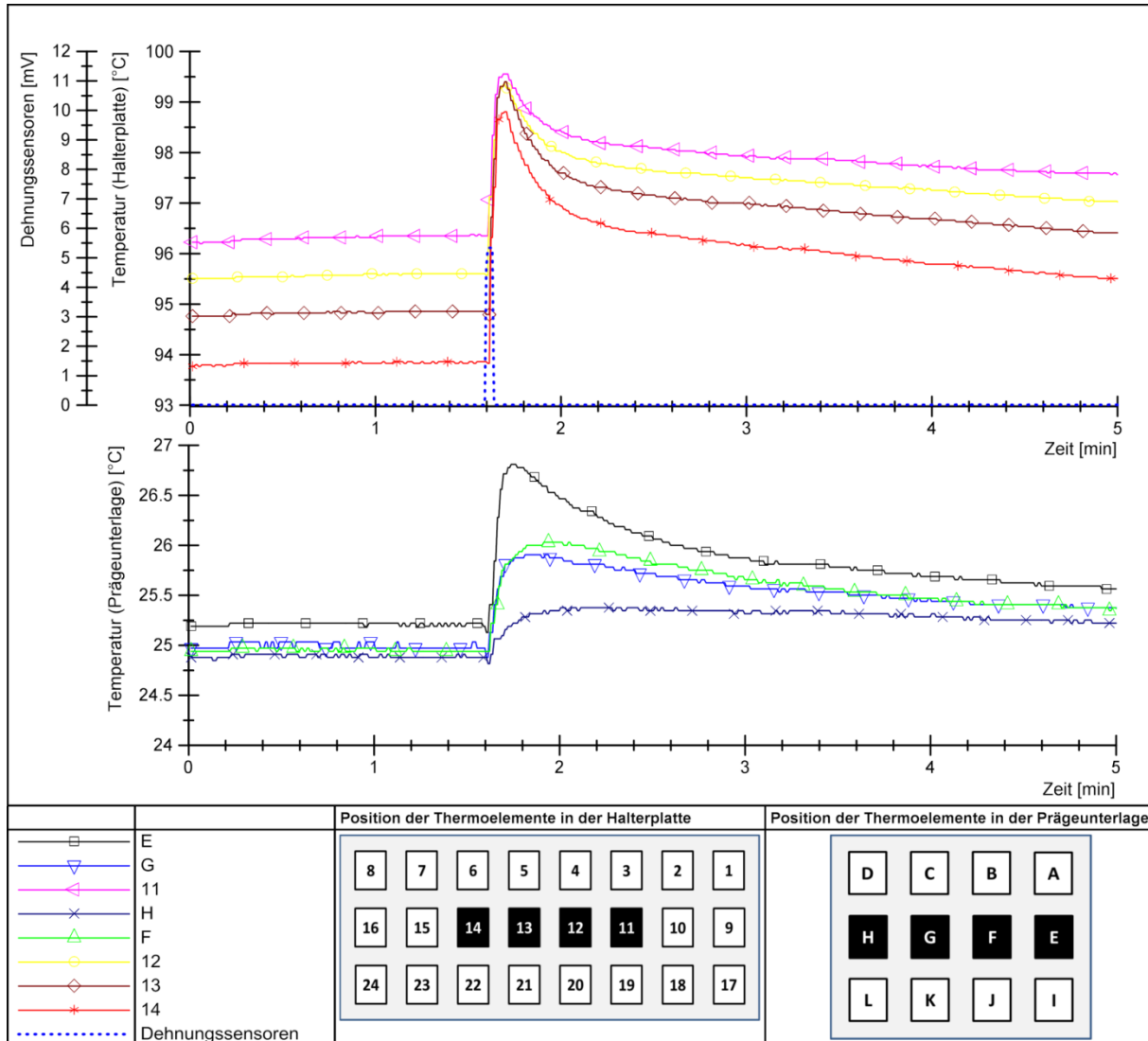


Abb. 5.21: Temperatur in der Halterplatte und in der Prägeunterlage beim Prägefoliendruckvorgang mit der Prägefolie **HS 19-3** und dem **Stahlprägwerkzeug**: Soll-Temperatur 120 °C, Anpressdruck 40 kN und Prägezeit 2 Sekunden. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung, in der Prägeunterlage – Abb. 5.15 (siehe Seite 74). Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt bei 28 °C.

Innerhalb von wenigen Minuten pendeln sich die Temperaturen sowohl in der Halterplatte als auch in der Prägeunterlage auf den Wert vor dem Prägefoliendruckvorgang ein. Dieser Vorgang dauert zwischen 4 und 5 Minuten.

Die Ergebnisse für die Temperaturmessungen während des Prägefoliendrucks der Prägefolie HS 19-3 bei Prägezeiten von 10 und 20 Sekunden für die beiden Prägwerkzeuge sind in Anhang 9B zu finden. Das beschriebene Verhalten ist bei den längeren Prägezeiten deutlicher zu sehen.

Wenn der Prägefoliendruckvorgang der Prägefolie HS 19-3 fünf Mal nacheinander durchgeführt wird, ist ein ähnlicher Temperaturverlauf, wie bei einem einzelnen Prägefoliendruckvorgang, festzustellen (Abb. 5.22: Messingprägewerkzeug und Abb. 5.21: Stahlprägewerkzeug).

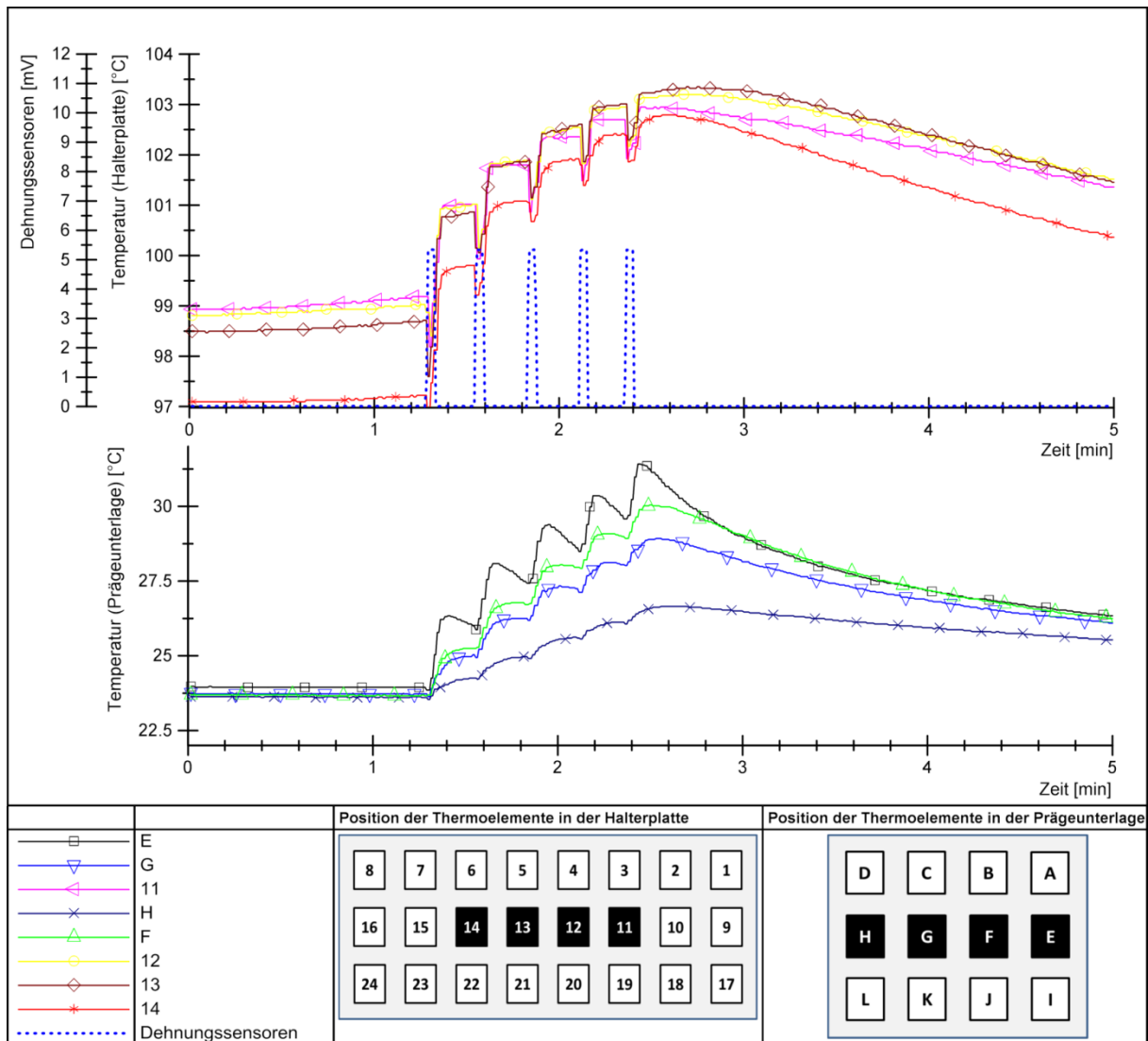


Abb. 5.22: Temperatur in der Halterplatte und in der Prägeunterlage bei fünfmaligem Prägefoliendruckvorgang mit der Prägefolie **HS 19-3** und dem **Messingprägewerkzeug**: Soll-Temperatur 120 °C, Anpressdruck 40 kN und Prägezeit 2 Sekunden. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung, in der Prägeunterlage – Abb. 5.15 (siehe Seite 74). Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt bei 27 °C.

Bei jedem Prägefoliendruckvorgang sinken die Temperaturen in der Halterplatte beim Messingprägewerkzeug in den ersten Millisekunden und steigen in der Prägeunterlage an. Kurz danach kommt eine Temperaturerhöhung in der Halterplatte, die mit dem Zuschalten der Heizpatronen der Prägeeinheit verbunden ist. Die Temperaturerhöhung zeitgleich mit dem Anfang des Prägefoliendruckvorgangs ist ohne kurze Absenkung beim Stahlprägewerkzeug zu beobachten.

Im Anschluss sinken die während eines Prägefoliendruckvorgangs aufgestiegenen Temperaturen in der Halterplatte nur so lange bis ein nachfolgender Prägefoliendruckvorgang

stattfindet. Dies verläuft beim Messingprägewerkzeug langsamer als beim Stahlprägewerkzeug. Insgesamt erhöhen sich die Temperaturen der Halterplatte nach den fünf Prägefoliendruckvorgängen um ca. 6,5 °C im Fall mit dem Messingprägewerkzeug, im Fall mit dem Stahlprägewerkzeug – um ca. 8 °C.

Zeitgleich mit dem Anfang des Prägefoliendruckvorgangs ist eine Temperaturerhöhung in der Prägeunterlage, die noch kurz nach dem Ende des Prägefoliendruckvorgangs stattfindet, zu beobachten. Danach sinken die Temperaturen in der Prägeunterlage im Durchschnitt um 0,5 °C und steigen mit dem Anfang des nächsten Prägefoliendruckvorgangs wieder. Für den Fall mit dem Messingprägewerkzeug erhöhen sich die Temperaturen in der Prägeunterlage insgesamt um ca. 7,5 °C, bei dem Stahlprägewerkzeug – ca. 5,5 °C.

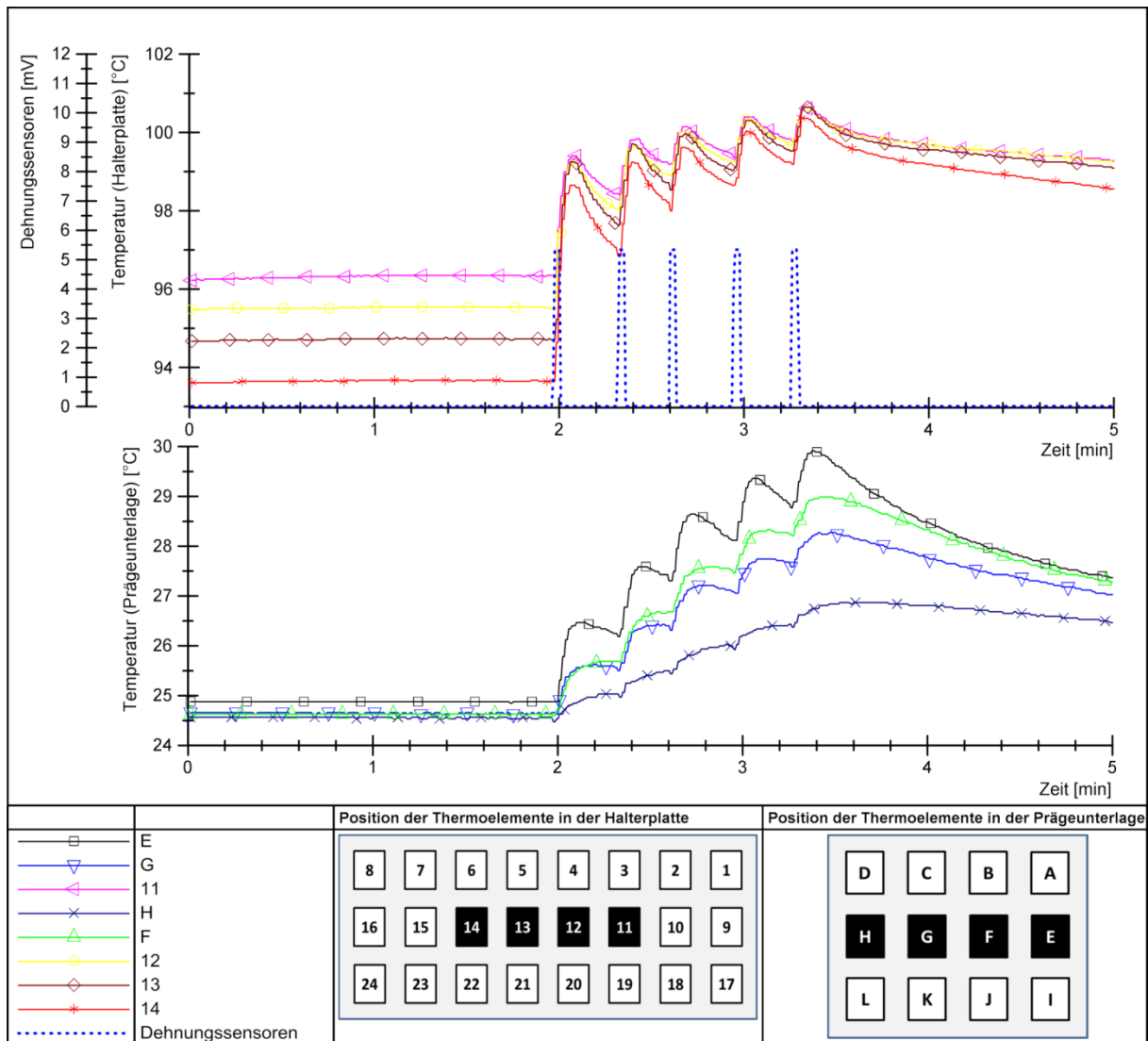


Abb. 5.23: Temperatur in der Halterplatte und in der Prägeunterlage bei fünfmaligem Prägefoliendruckvorgang mit der Prägefolie **HS 19-3** und dem **Stahlprägewerkzeug**: Soll-Temperatur 120 °C, Anpressdruck 40 kN und Prägezeit 2 Sekunden. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung, in der Prägeunterlage – Abb. 5.15 (siehe Seite 74). Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt bei 28,4 °C.

Innerhalb von wenigen Minuten nach den Prägefoliendruckvorgängen pendeln sich die Temperaturen sowohl in der Halterplatte als auch in der Prägeunterlage auf den Wert vor dem Prägefoliendruckvorgang ein.

5.2.2.4 Diskussion und Zusammenfassung

Unmittelbar nach Beginn des Prägefoliendruckvorgangs findet ein Absinken der Temperatur in der Prägeeinheit beim Messingprägewerkzeug statt. Dieser Zeitabschnitt ist bei den beiden Prägefolien identisch. Dies ist mit der besseren Wärmeleitfähigkeit vom Messing verbunden und liegt an der schnellen Wärmeabgabe an die Prägefolie, das Substrat und die Prägeunterlage innerhalb von wenigen Millisekunden. Aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit vom Stahl ist keine ähnliche Temperaturabsenkung in der Halterplatte beim Stahlprägewerkzeug festzustellen.

Die kurzer Absenkung der Temperaturen beim Messingprägewerkzeug nachfolgende und dem Prägefoliendruckvorgangsbeginn beim Stahlprägewerkzeug zeitgleiche Temperaturerhöhung in der Halterplatte ist vermutlich im Regelungssystem der GEBA 6 hinterlegt. Eine Zuschaltung der Spannung und somit eine Nachheizung der Heizpatronen wird zeitgleich mit dem Betätigen der Start-Taste der GEBA 6 und dem Anfang eines Prägefoliendruckvorgangs geregelt.

Im Allgemeinen findet die Temperaturerhöhung in der Halterplatte bis zu einem bestimmten Punkt, der vermutlich durch die Temperaturregelung der GEBA 6 nach dem Zweipunkt-Regelungsprinzip (siehe Abschnitt 2.2.3) festgelegt ist und mittels der Sensoren Pt100 kontrolliert wird, statt. Beim Erreichen dieses maximalen Temperaturpunktes werden die Heizpatronen ausgeschaltet, womit eine Temperatursenkung in der Halterplatte beginnt. Sowohl die Temperaturerhöhung als auch die nachfolgende Temperatursenkung ist beim Stahlprägewerkzeug deutlicher als beim Messingprägewerkzeug zu sehen. Ein wesentlicher Unterschied bei den Temperaturverläufen in der Halterplatte beim Wechseln der Prägefolien ist nicht festzustellen. Bei den längeren Prägezeiten sind die beschriebenen Effekte in der Halterplatte deutlicher zu beobachten.

Zeitgleich mit dem Anfang des Prägefoliendruckvorgangs erhöhen sich die Temperaturen in der Prägeunterlage. Sie steigen auch während des Nachheizens der Prägeeinheit weiter. Die Ursache, warum die Temperaturen in der Prägeunterlage mit dem Angang des Prägefoliendruckvorgangs eine Differenz zu einander zeigen, liegt, erstens, an den relativ ungleichmäßig verteilten Temperaturen in der Halterplatte, die dementsprechend ungleichmäßigen Temperaturen in der Prägeunterlage erzeugen. Zweitens, die Auseinandersetzung der Temperaturen in der Prägeunterlage kann durch das Prägemotiv verursacht werden. Die erhabenen Stelle bzw. Prägestrukturen der Prägewerkzeuge haben beim Prägefoliendruckvorgang einen Kontakt mit der Prägefolie, dem Substrat und der Prägeunterlage und übertragen dadurch mehr Wärme an die Prägeunterlage als die tiefliegenden Stellen zwischen den Prägestrukturen.

Kurz nach dem Prägefoliendruckvorgang fangen die Temperaturen in der Prägeunterlage zu sinken an. Ein Unterschied bei den Temperaturverläufen der unterschiedlichen Prägefolien ist

nicht zu sehen. Es gibt allerdings einen Unterschied beim Wechseln der Prägewerkzeuge. Die Prägeunterlage erwärmt sich vom Messingprägewerkzeug um ca. 1 °C mehr.

Die Resultate für fünf nacheinander abgewickelte Prägefoliendruckvorgänge zeigen ähnliche Ergebnisse, wie bei nur einem Prägefoliendruckvorgang. Der Unterschied ist, dass die Temperaturen sowohl in der Halterplatte als auch in der Prägeunterlage höher als nur nach einem Prägefoliendruckvorgang sind. Eine weitere Temperaturerhöhung in der Prägeeinheit und in der Prägeunterlage ist bei weiteren nachfolgenden Prägefoliendruckvorgängen zu erwarten. Allerdings ist zu vermuten, dass sie nur bis zu einem bestimmten Temperaturpunkt gehen wird. Dieser Temperaturpunkt wurde mit den durchgeführten Experimenten nicht festgestellt.

Weitere Schwankungen der Temperaturen in der Halterplatte und in der Prägeunterlage bei gleichen Ausgangsparametern sind auf die Umgebungstemperatur zurückzuführen, welche an den Messtagen um bis zu 6 °C variierte.

5.2.3 Schlussfolgerungen

Obwohl die Messungen mit dem Temperaturmessaufbau „Aufheizen“ außerhalb der in der Arbeit festgelegten Prozessgrenze (siehe Abschnitt 3.1) durchgeführt worden sind, können dadurch einige Schlussfolgerungen gezogen werden, die für den Eingangsparameter Prägetemperatur relevant sind.

Wenn die Prägeeinheit von der Umgebungstemperatur auf eine Soll-Temperatur aufgeheizt wird, ist mit einer Wartezeit von mindestens 35 Minuten zu rechnen. Während dieser Zeit pendeln sich die Temperaturen in der Prägeeinheit ein und schwanken um 2,5 °C bei der Soll-Temperatur von 100 °C durch das kurze Nachheizen. Dieser Wert erhöht sich mit der steigenden Soll-Temperatur. Die absoluten Temperaturwerte in der Halterplatte liegen mindestens um 10 °C niedriger als der eingestellte Soll-Wert. Die Differenz zum Soll-Wert erhöht sich ebenfalls mit der steigenden Soll-Temperatur.

Die Streuung der über die Fläche der Halterplatte gemessenen Temperaturwerte steigt ebenfalls mit der steigenden Soll-Temperatur an und liegt bei der Soll-Temperatur von 100 °C bei 2,5 °C. Genauso erhöht sich die Streuung über die Fläche der gemessenen Temperaturwerte im Bereich oberhalb der gravierten Prägestrukturen auf den Prägewerkzeugen von 1,5 °C (bei der Soll-Temperatur von 100 °C). An einem Messpunkt schwanken die Temperaturen um bis zu 2,5 °C.

Aufgrund der relativ niedrigen Dicken der Prägewerkzeuge, wird vermutet, dass die Prägetemperaturen auf den Oberflächen der Prägewerkzeuge den gleichen Wert, wie die gemessenen Temperaturen in der Halterplatte haben, und sich ähnlich über die Oberfläche verteilen. Diese Annahme wird für die Prägetemperatur als Eingangsparameter im weiteren Verlauf dieser Arbeit beibehalten.

Zur Überprüfung dieser Annahme können keine Thermoelemente direkt auf der Oberfläche der Prägewerkzeuge eingesetzt werden, da in diesem Fall eine Schwierigkeit mit Fixierung der Thermoelemente besteht. Die Vermessung der Prägetemperaturen mit einem

Temperaturmessgerät, wie z. B. testo 735-1, führt aufgrund eines schlechten Kontakts der Fühler des testo 735-1 mit der Oberfläche der Prägewerkzeuge und wackelnder manueller Halterung des Temperaturmessgerätes neben dem Prägewerkzeug ebenfalls zu keinem brauchbaren Ergebnis. Der Versuch, eine Wärmebildkamera einzusetzen, ist erschwert, da der Abstand zwischen dem Prägetisch und dem Prägewerkzeug für eine stationäre Positionierung der Wärmebildkamera nicht ausreichend ist. Ein Abbau der Prägeeinheit und deren senkrechte Positionierung auf dem Prägetisch können zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen und werden im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

Die oben beschriebene Annahme wird mittels einer FEM-Simulation überprüft, zu deren Validierung die Ergebnisse aus Abschnitt 5.2.1 benutzt werden. Die Ergebnisse der ANSYS-Simulation der Prägetemperaturen auf der Messingprägewerkzeugoberfläche zeigen, dass diese Annahme gerechtfertigt ist. Die Vorgehensweise und Ergebnisse der ANSYS-Simulation sind in Anhang 10 zu finden.

Durch den Temperaturmessaufbau „Prägefoliendruckvorgang“ wurden die Temperaturverläufe während des Prägefoliendruckvorgangs genauer betrachtet. Nützlich ist die Erkenntnis, dass sowohl die Prägeeinheit als auch die Prägeunterlage nach dem Prägefoliendruckvorgang eine erhöhte Temperatur haben. Je mehr Prägefoliendruckvorgänge nacheinander abgewickelt werden, desto höher sind die Temperaturen. Es wird vermutet, dass dieser Anstieg nur bis zu einem bestimmten Temperaturpunkt stattfindet.

Die Prägeunterlage erwärmt sich beim Einsatz des Messingprägewerkzeuges schneller als beim Einsatz des Stahlprägewerkzeuges, wobei das Messingprägewerkzeug eine geringere Temperatur als das Stahlprägewerkzeug erreicht und sich langsamer und gleichmäßiger nach dem Prägefoliendruckvorgang auf die Anfangstemperatur abkühlt. Dieser Fakt kann eine Auswirkung auf die Prägeergebnisse haben, welcher im weiteren Verlauf dieser Arbeit überprüft wird.

Da kein sichtbarer Unterschied in den Temperaturverläufen beim Wechseln der gewählten Prägefolien festzustellen ist, wird vermutet, dass ein möglicher Unterschied in den Prägeergebnissen bei zwei Prägefolien durch die Eigenschaften und Qualität der Prägefolien selbst verursacht wird (bei gleichen Prozessparametern und -materialien).

5.2.4 Kennlinie zur Kompensation der Prägetemperatur

Nach den in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Temperaturmessergebnissen und unter der Annahme der Gleichheit der gemessenen Temperaturen in der Halterplatte zu den herrschenden Prägetemperaturen auf den Prägewerkzeugoberflächen kann eine Kennlinie zur Kompensation der Prägetemperatur vor dem Prägefoliendruck an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 ermittelt werden. Als Prägetemperatur wird der Mittelwert aller Temperaturen, die mit acht Thermoelementen nach dem Einpendeln gemessen wurden (siehe alle Abb. in Abschnitt 5.2.1.3 und Anhang 8), angegeben. Aufgrund des geringen Unterschieds der gemessenen Temperaturen bei den beiden Prägewerkzeugen (unter 1 °C) wird dafür der Mittelwert der beiden benutzt. Mit den Fehlerbalken ist der Schwankungsbereich der gemessenen Temperaturen abgebildet.

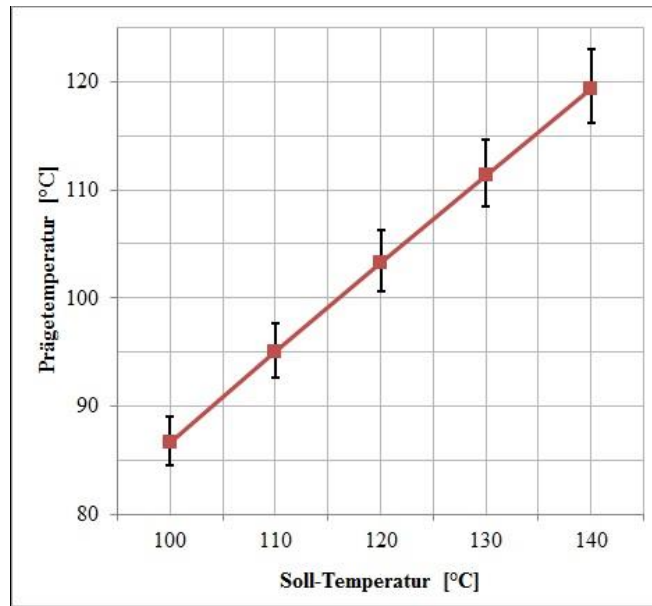


Abb. 5.24: Kennlinie zur Kompensation der Prägetemperatur vor dem Prägefoliendruck an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6.

Die Kennlinie kann mit folgender Gleichung beschrieben werden:

$$T_{Pr} = 0,83 \times T_{Soll} + 3,76, \quad (5.1)$$

wobei T_{Pr} – die Prägetemperatur, T_{Soll} – die Soll-Temperatur an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 sind. Die Bestimmtheitsmaß R^2 nach Zwerenz [ZWE06] liegt bei 0,9999.

Der Kennlinie und den Ergebnissen des Abschnitts 5.2.1 zur Folge liegen die Prägetemperaturen im Durchschnitt bei 14 % unter dem über den Arbeitsbildschirm eingestellten Soll-Wert.

5.3 Anpressdruck

Die Richtigkeit der Anpressdruckanzeige am Arbeitsbildschirm der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 wurde bei der Installation vom Hersteller überprüft und kalibriert. Aus diesem Grund werden keine zusätzlichen Messungen des absoluten Anpressdrucks im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt.

Es ist allerdings für die Findung des Zusammenhangs zwischen den Eingangs- und Ausgangsparametern im untersuchten Prägefoliendrucksystem relevant, die Verteilung des Anpressdrucks auf der Fläche der beiden Prägewerkzeuge zu wissen. Sie hat eine Auswirkung auf Teilprozess I des in der Arbeit untersuchten Prägefoliendruckprozesses.

5.3.1 Messungen

Um die Verteilung des Anpressdrucks an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 zu untersuchen, wird die Druckmessfolie Prescale der Firma FUJIFILM eingesetzt [FUJ13]. Auf

dünnem Folienträger ist in Mikrokapseln Färbematerial eingebracht, welches bei einem kritischen Druck mit einem Farentwickler reagiert und rote Farbflächen erzeugt. Die Genauigkeit solcher Druckmessfolien liegt bei $\pm 10\%$.

Für die Messungen der Anpressdruckverteilung wird entsprechend der Prägeunterlage und dem eingestellten Anpressdruck von 40 kN der Prägetisch ausgerichtet. Die Messungen werden jeweils einmal mit den beiden Prägewerkzeugen durchgeführt.

Um den nötigen Druckbereich bei Auswahl der Druckmessfolie Prescale zu bestimmen, wird der Soll-Anpressdruck für das jeweilige Prägewerkzeug bei 40 kN ausgerechnet. Dafür wird zuerst die gesamte Fläche der Prägestrukturen des jeweiligen Prägewerkzeuges berechnet. Beim Messingprägewerkzeug ist sie $370,38 \text{ mm}^2$, beim Stahlprägewerkzeug $340,45 \text{ mm}^2$ (siehe Abb. 4.1 auf Seite 43 und Abmessungen in Anhang 3). Im nächsten Schritt wird der Soll-Wert von 40 kN durch die gesamte Fläche der Prägestrukturen für jedes Prägewerkzeug getrennt geteilt.

So folgt, dass der Anpressdruck beim Messingprägewerkzeug bei 40 kN $0,11 \text{ kN/mm}^2$ entspricht und beim Stahlprägewerkzeug $0,12 \text{ kN/mm}^2$. Bezogen auf diese Werte wird die passende Druckmessfolie, nämlich Prescale HS (Druckbereich 50-130 MPa oder $0,05\text{-}0,13 \text{ kN/mm}^2$), verwendet.

Die Druckmessfolie wird direkt (ohne Prägefolie und Substrat) mit den beiden Prägewerkzeugen 2 Sekunden lang geprägt. Die Prägeeinheit wird im Moment nicht beheizt, um mögliche Beschädigungen der Druckmessfolien zu vermeiden. Als Prägeunterlage wird die bereits erwähnte Stahlplatte (siehe Abschnitt 4.5) verwendet.

5.3.2 Ergebnisse

In Abb. 5.25 und Abb. 5.26 sind die Druckmessfolien HS nach dem Prägefoliendruckvorgang mit jedem Prägewerkzeug bei 40 kN (Soll-Wert) abgebildet.

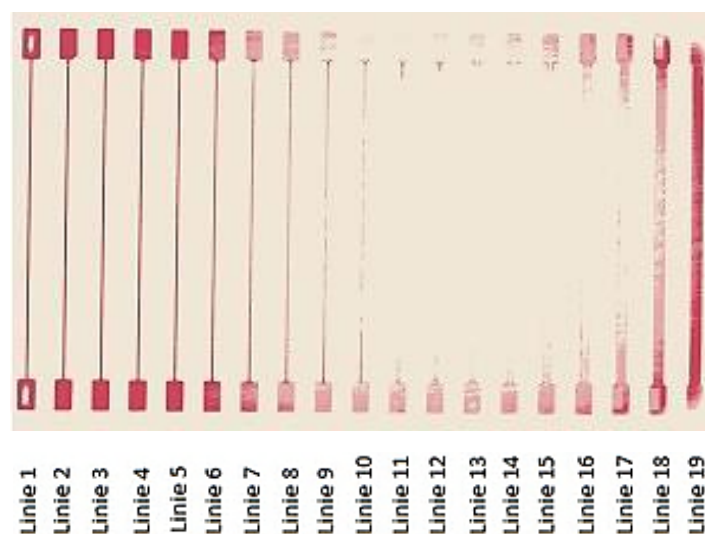


Abb. 5.25: Verteilung des Anpressdrucks ermittelt mit der Prescale HS Druckmessfolie beim Prägefoliendruckvorgang mit dem **Messingprägewerkzeug** bei 40 kN 2 Sekunden lang. Das Layout ist in Abb. 4.1 (siehe Seite 43) dargestellt.

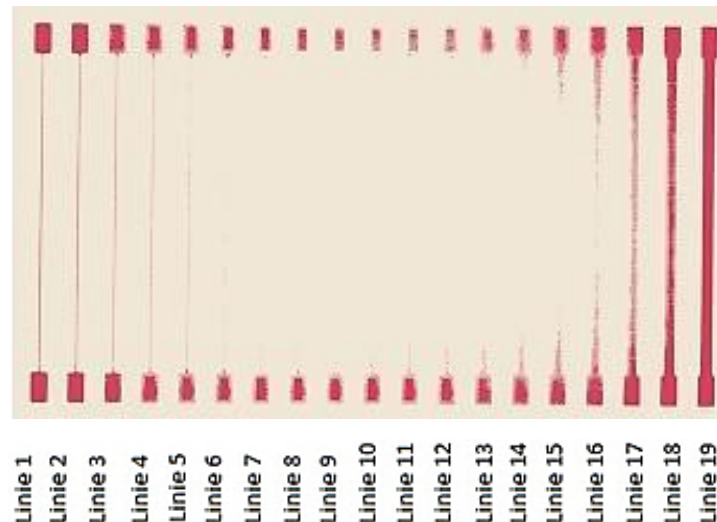


Abb. 5.26: Verteilung des Anpressdrucks ermittelt mit der Prescale HS Druckmessfolie beim Prägefoliendruckvorgang mit dem **Stahlprägewerkzeug** bei 40 kN 2 Sekunden lang. Das Layout ist in Abb. 4.1 (siehe Seite 43) dargestellt.

Für die beiden Prägewerkzeuge ist die Inhomogenität der Anpressdruckverteilung während des Prägefoliendruckvorgangs sichtbar. Für das Messingprägewerkzeug ist es vor allem im Bereich mit den breiteren Prägestrukturen (ab Linie 7) gut erkennbar, dass der Anpressdruck in diesem Bereich abfällt, für das Stahlprägewerkzeug im mittleren Bereich (Linien 4-17). Sowohl die Linien selbst als auch die Kontaktflächen (Bezeichnung nach Abb. 4.2 auf Seite 44) weisen inhomogene Anpressdruckverteilung auf.

Eine quantitative Beurteilung der Verteilung des Anpressdrucks kann im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden. Die Beurteilung der auf der Druckmessfolie erzeugten roten Farbtöne kann mittels einer selbst ausgedruckten Farbskala der Firma FUJIFILM zur fehlerhaften Aussage führen, da davor eine Farbkalibration und –abstimmung benötigt wird.

5.3.3 Diskussion und Zusammenfassung

Durch die Überprüfung der Anpressdruckverteilung während des Prägefoliendruckvorgangs mit den beiden Prägewerkzeugen mittels der Druckmessfolie Prescale ist eine Inhomogenität erkennbar. Diese Überprüfung wurde nur qualitativ durchgeführt.

Generell ist zu berücksichtigen, dass die Prescale HS Druckmessfolie im Druckbereich zwischen $0,05 \text{ kN/mm}^2$ und $0,13 \text{ kN/mm}^2$ misst. Die untere messbare Grenze liegt hier bei $0,05 \text{ kN/mm}^2$. Das heißt, dass die in Abb. 5.25 und Abb. 5.26 schlecht abgebildeten Bereiche einen niedrigen Anpressdruck (unter $0,05 \text{ kN/mm}^2$, dies gleicht an der GEBA 6 eingestellten $18,5 \text{ kN}$ beim Messingprägewerkzeug und 17 kN beim Stahlprägewerkzeug) aufweisen.

Ein weiterer möglicher Grund für die Inhomogenität kann eine unebene Fläche der Prägewerkzeuge und/oder der Prägeunterlage sein, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht überprüft wurden.

Sowohl diese Erkenntnisse als auch die Inhomogenität der Anpressdruckverteilung können ihre Auswirkung auf die Prägeergebnisse haben und werden bei der Untersuchung der Ausgangsparameter berücksichtigt.

5.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die in Kapitel 3 beschriebenen und für das definierte Prägefoliendrucksystem relevanten Prozessparameter an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 festgelegt und dementsprechend genauer überprüft.

So wurden die Übereinstimmung des Soll- und Ist-Werts der Prägetemperatur untersucht und eine Kennlinie zur Kompensation des Prägetemperaturwerts vor dem Prägefoliendruck ermittelt (siehe Abb. 5.24). Außerdem wurden mittels des Temperaturmessaufbaus Erkenntnisse über die Temperatur und deren Verlauf in der Prägeeinheit vor und während eines Prägefoliendruckvorgangs erlangt. Dabei wurde die nötige Aufheizzeit vor dem Prägefoliendruck an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 bestimmt und eine Temperaturerhöhung in der Prägeeinheit nach einem Prägefoliendruckvorgang festgestellt, deren Einfluss auf die Prägeergebnisse im Rahmen dieser Arbeit vermieden werden soll. Zusätzlich wurde die Temperaturerhöhung beim Prägefoliendruckvorgang in der Prägeunterlage nachvollzogen.

Außer der Prägetemperatur wurden der Anpressdruck und dessen inhomogene Verteilung über die Fläche der Prägewerkzeuge während eines Prägefoliendruckvorgangs betrachtet. Die absolute Prägezeit wurde gleich dem angezeigten Soll-Wert angenommen.

Der weitere Prozessparameter Abkühlzeit wurde von der weiteren Untersuchung in dieser Arbeit ausgeschlossen. Die Prozessparameter, wie Abziehkraft F_{ab} , -winkel φ_{ab} und -zeit, die maschinenspezifisch sind, wurden nicht untersucht und ohne Bestimmung des exakten Werts als konstant angenommen.

Die durchgeführten Untersuchungen liefern Erkenntnisse über die Schwankungen der Prozessparameter an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6, welche bei der Findung eines Zusammenhangs zwischen Eingangs- und Ausgangsparameter im betrachteten Prägefoliendrucksystem hilfreich sind.

Die Untersuchung der Ausgangsparameter sowie die Findung der angekündigten Korrelation mit den in Kapiteln 4 und 5 erläuterten Eingangsparametern werden in Kapitel 6 durchgeführt und beschrieben.

6. Untersuchung der Ausgangsparameter

In diesem Kapitel wird die Untersuchung der Ausgangsparameter im nach Abb. 3.3 (siehe Seite 29) betrachteten Prägefoliendrucksystem an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 durchgeführt und beschrieben.

Zuerst werden die Ausgangsparameter für die Untersuchung festgelegt. In erster Linie wird das Prägegut mit seinen dimensional Eigenschaften beurteilt. Im Anschluss werden die während der Experimente benutzten Prägewerkzeuge und die Prägeunterlage qualitativ überprüft. Weiter wird der Ablauf der Experimente an der GEBA 6 mit den in Kapiteln 4 und 5 voruntersuchten Eingangsparametern vorgestellt. Für eine bessere Übersicht wird ein Schema mit untereinander kombinierten Prozessmaterialien und Prozessparametern erstellt.

Bei der Untersuchung der Ausgangsparameter der Prägegüter wird als quantitatives Kriterium die Linienstärke der geprägten Strukturen festgelegt. Dieser Ausgangsparameter wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels im Zusammenhang mit den unterschiedlichen Eingangsgrößen betrachtet und beurteilt. Am Ende wird die Korrelation zwischen dieser Ausgangsgröße und den bereits untersuchten Eingangsparametern mit einer statistischen Methode berechnet. Weitere Ausgangsparameter der Prägegüter werden für eine qualitative Beurteilung des Einflusses der Eingangsparameter auf die Prägeergebnisse verwendet.

6.1 Festlegung der Ausgangsparameter

Im Hinblick auf die Anwendung des Prägefoliendrucks im Elektronikbereich spielen mehrere Ausgangsparameter eine wichtige Rolle (siehe Abschnitt 3.3.2 und Tabelle 3.2 auf Seite 36). Außer den dimensional Eigenschaften, wie Homogenität, Auflösung, Kantenrauheit, Schichtdicke und Oberflächenrauheit der Schichten, werden hier die elektrischen Eigenschaften der Prägegüter geprüft. Ihre physikalische Größe und weitere Eigenschaften stehen im Wesentlichen mit denselben dimensional Charakteristiken im direkten Zusammenhang.

Da schon bei der Auswahl der Prägefolien bekannt war, dass die beiden Prägefolien, Luxor GTS Premium 355 und HS 19-3, über gute elektrische Leitfähigkeit verfügen (siehe Abschnitt 4.3), werden im Rahmen dieser Arbeit die dimensional Eigenschaften der Prägegüter untersucht. Dabei ist es von Interesse, den Zusammenhang der einzelnen Eingangs- und Ausgangsparameter des Prägefoliendrucksystems zu verstehen.

Das Kriterium zur quantitativen Untersuchung wird die Größe der geprägten Strukturen bzw. die Linienstärke der geprägten Linien festgelegt. Diese wurde ebenfalls bei den Prägewerkzeugen untersucht (siehe Abschnitt 4.2.3) und kann den Einfluss der

Prägetemperatur, Prägezeit und des Anpressdrucks auf die Prägeergebnisse aufzeigen. Die weiteren Kriterien, wie Homogenität, Kantenrauheit, übertragene Schichtdicke und ihre Oberflächenrauheit, werden nur qualitativ untersucht und bewertet. Ebenfalls qualitativ werden die Prägewerkzeuge und die Prägeunterlage nach einigen Prägefoliendruckvorgängen untersucht. Eine Auflistung der untersuchten Ausgangsparameter ist in Tabelle 6.1 zu sehen. Sie sind blau markiert.

Tabelle 6.1: Schematische Darstellung der Ausgangsparameter des in Abb. 3.3 (siehe Seite 29) dargestellten Prägefoliendrucksystems im Hinblick auf die Anwendung des Verfahrens im Elektronikbereich. Mit blau sind die untersuchten Ausgangsparameter markiert.

<i>Ausgangsparameter</i>	
1. Prägegut	2. Weiteres Prozessmaterial
<u>1.1 Dimensionale Eigenschaften</u>	<u>2.1 Prägewerkzeug</u>
1.1.1 Homogenität	2.1.1 Zustandsänderung
1.1.2 Auflösung der geprägten Strukturen	2.1.2 Lebensdauer
a) Strukturgröße	
b) Zwischenabstand	<u>2.2 Prägeunterlage</u>
c) Anzahl der geprägten Strukturen pro Einheit	2.2.1 Zustandsänderung
1.1.3 Kantenrauheit	2.2.2 Lebensdauer
1.1.4 Schichtdicke	
1.1.5 Oberflächenrauheit	<u>2.3 Polyesterträger</u>
<u>1.2 Elektrische Eigenschaften</u>	
1.2.1 Elektrische Leitfähigkeit der Metallisierung	
a) Physikalische Größe	
b) Stabilität	
c) Homogenität	
d) Wiederholbarkeit	
1.2.2 Elektrische Isolierfähigkeit der Klebe- und Schutzschicht	
1.2.3 Kontaktierungsfähigkeit	
<u>1.3 Weitere Eigenschaften</u>	
1.3.1 Thermische Beständigkeit	
1.3.2 Mechanische Beständigkeit	
1.3.3 Chemische Beständigkeit	
1.3.4 Alterungsbeständigkeit	

6.2 Ablauf der Experimente

Die Prägefoliendruckexperimente finden an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 mit den in Kapiteln 4 und 5 festgelegten und untersuchten Eingangsparametern statt. So werden mehrere Eingangsparameter variiert und einige davon werden zur Abgrenzung der Untersuchungen konstant gehalten. Eine Übersicht der Eingangsparameter bei den

Experimenten ist in Tabelle 6.2 dargestellt. Für die Prozessparameter werden die Ist-Werte vom Arbeitsbildschirm der GEBA 6 übernommen.

Tabelle 6.2: Übersicht der Prägefoliendruckexperimente mit entsprechenden variablen und konstanten Eingangsparametern: Prozessmaterialien und Prozessparameter.

<div>Prozess- material</div> <div>Prozess- parameter</div>	Stahlprägeunterlage															
	125-µm Hostaphan GN 4600 PET-Folie															
	Messingprägewerkzeug								Stahlprägewerkzeug							
	Prägefolie HS 19-3			Prägefolie Luxor GTS Premium 355					Prägefolie HS 19-3			Prägefolie Luxor GTS Premium 355				
Aufheizzeit [min]	35															
Pausen zwischen Prägefolien-druck-vorgängen [min]	3-5															
Soll-Temperatur [°C]	100	110	120	100	110	120	130	140	100	110	120	100	110	120	130	140
Prägezeit [s]	Anpressdruck, kN															
2	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
5	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
10	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
15			30 35 40					30 35 40			30 35 40					30 35 40
20			40					40			40					40
Abkühlzeit [s]	0															
Abziehwinkel φ_{ab} , -kraft F_{ab} , -zeit	konstant (maschinenbedingt)															

In die Experimente werden die beiden untersuchten Prägewerkzeuge (siehe Abschnitt 4.2) einbezogen: aus Messing und Stahl, beide im Format DIN A5 mit den nach dem Layout in Abb. 4.1 (siehe Seite 43) gravierten Prägestrukturen. Als Substrat wird die Hostaphan GN 4600 PET-Folie verwendet. Der Prägefoliendruck erfolgt auf der vorbehandelten Seite der PET-Folie (siehe Abschnitt 4.4). Als Prägeunterlage wird die Stahlplatte im Format DIN A4 (Abschnitt 4.5) verwendet. Es werden zwei Typen der Prägefolien in den Experimenten verwendet: Prägefolie Luxor GTS Premium 355 mit Aluminiumgrundschrift und die 22-karat goldene Prägefolie HS 19-3 (siehe Abschnitt 4.3).

Die genannten Prägefolien werden nacheinander mit den beiden Prägewerkzeugen und mit nach Tabelle 6.2 variierten Prozessparametern geprägt. Beim Prägefoliendruckvorgang werden die Soll-Temperatur, die Prägezeit und der Anpressdruck verändert.

Die Soll-Temperatur an der GEBA 6 für die Prägefolie Luxor GTS Premium 355 wird von 100 °C bis 140 °C in 10 °C-Schritten variiert, für die Prägefolie HS 19-3 – von 100 °C bis 120 °C ebenfalls in 10 °C-Schritten. Diese Soll-Temperaturen werden unter Berücksichtigung der Herstellerempfehlung für die Prägefolien und der thermischen Beständigkeit der PET-

Folie bis ca. 150 °C (siehe Abschnitt 4.4) ausgewählt. Nach den Ergebnissen aus dem Abschnitt 5.2.1 werden die Erfahrungswerte über die Aufheizzeiten übernommen. Diesen nach wird die GEBA 6 vor den Prägefoliendruckexperimenten jedes Mal mindestens 35 Minuten vorgeheizt. Um den Einfluss auf die Prägeergebnisse durch die Temperaturerhöhung in der Prägeeinheit und in der Prägeunterlage nach mehreren nacheinander abgewickelten Prägefoliendruckvorgängen zu vermeiden (siehe Abschnitt 5.2.2), werden die Prägegüter mit einem zeitlichen Abstand von ca. 3-5 Minuten voneinander geprägt.

Bei jeder Soll-Temperatur wird die Prägezeit verändert. Die Zeitintervalle liegen bei 2 s, 5 s, 10 s, 15 s und 20 s. Größere Zeitintervalle werden nicht untersucht, da sie für eine reale Produktion nur selten relevant sind.

Der Anpressdruck wird bei den meisten Prägefoliendruckvorgängen auf seinen maximalen Soll-Wert bei 40 kN eingestellt. Um dessen Auswirkung auf die Prägeergebnisse nachzuvollziehen, wird er bei 15 Sekunden Prägezeit für die Luxor GTS Premium 355 Prägefolie bei 140 °C und für die HS 19-3 Prägefolie bei 120 °C von 30 kN bis 40 kN in 5-kN-Schritten variiert. Da die meisten Prägefolien bei einem Anpressdruck unter 30 kN schlechte Qualität bzw. fehlende Stellen aufweisen (aufgrund inhomogener Anpressdruckverteilung, siehe Abschnitt 5.3), wird dieser Bereich (unter 30 kN) aus der Untersuchung ausgeschlossen.

Die Abkühlzeit wird auf 0 Sekunden gestellt. Die Abziehwinkel φ_{ab} , -kraft F_{ab} , -zeit werden nicht variiert und bleiben maschinenbedingt konstant.

Für jede Kombination der Prozessmaterialien und Prozessparameter wird ein Prägegut gefertigt (insgesamt für alle Eingangsparameter 64 Prägegüter jeweils 19 Linien). Die Prägewerkzeuge werden dabei in der Prägeeinheit so positioniert, dass die Nummerierung der Linien entsprechend dem Layout (Abb. 4.1 auf Seite 43) von links nach rechts (von 1 bis 19, betrachtet aus Sicht des Bedieners) beim Prägefoliendruckvorgang beginnt. Diese Positionierung der Prägewerkzeuge ist gleich der Positionierung bei den durchgeführten Temperatur- (siehe Abschnitt 5.2) und Anpressdruckuntersuchungen (siehe Abschnitt 5.3).

Die Experimente werden in einem nicht klimatisierten Arbeitsraum ohne Reinraumvoraussetzungen durchgeführt. Die Umgebungsbedingungen werden dabei nicht dauernd kontrolliert. In diesem Zusammenhang wird der Einfluss der Störfaktoren auf die Prägeergebnisse im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht.

6.3 Homogenität und Kantenrauheit der geprägten Strukturen

Zur Überprüfung der Qualität der geprägten Linien kommt die optische Messtechnik, wie bei der Prägewerkzeuguntersuchung, zum Einsatz. Mit dem Mikroskop Leica DM4000M werden die Prägegüter auf die Homogenität der Schichten und Kantenrauheit geprüft und danach qualitativ beurteilt. Die optischen Aufnahmen erfolgen mit einer 50-fachen Vergrößerung. Für jeden nach Tabelle 6.2 untersuchten Eingangsparameter werden alle 19 Linien jedes Prägegutes mikroskopiert und als Bild gespeichert.

In Abb. 6.1 bis Abb. 6.8 sind Beispielaufnahmen der geprägten Linien dargestellt. Dabei sind jeweils Linie 1 und Linie 12 der beiden Prägefolien Luxor GTS Premium 355 und HS 19-3, die mit dem Messing- und Stahlprägewerkzeug geprägt wurden, dargestellt.

Allgemein geben die geprägten Strukturen die gravierten Prägestrukturen der Prägewerkzeuge gut wieder. Die fehlende Qualität bei der Bearbeitung der Prägewerkzeuge (vergleiche Abb. 4.4 auf Seite 44) ist vor allem bei den schmaleren Linien 1-10 bemerkbar (Abb. 6.3 und Abb. 6.7). Bei einigen Linien sind die Übergangsstellen schmaler und weisen die fehlenden Prägefolienstellen (z. B. Abb. 6.1 und Abb. 6.3) auf.

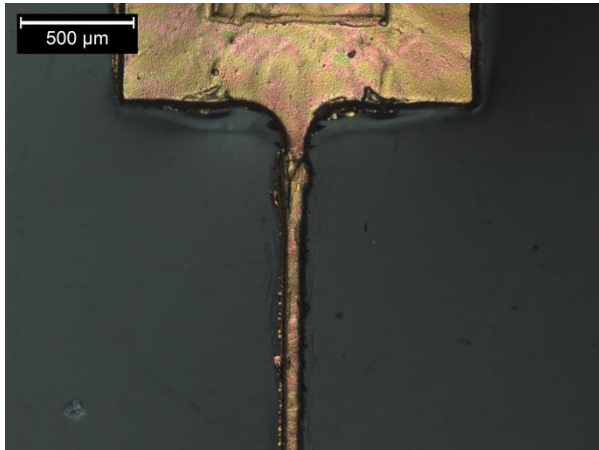


Abb. 6.1: Aufnahme mit dem Leica-Mikroskop der mit dem **Stahlprägewerkzeug** geprägten Linie 1 der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** mit 50-facher Vergrößerung. Prozessparameter: 100 °C, 40 kN, 1 Sekunden.

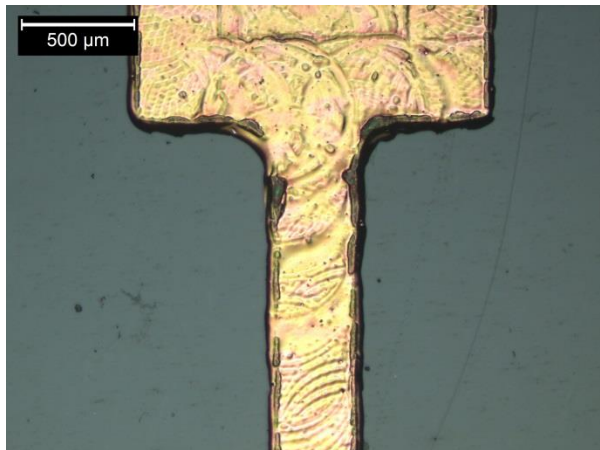


Abb. 6.2: Aufnahme mit dem Leica-Mikroskop der mit dem **Stahlprägewerkzeug** geprägten Linie 12 der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** mit 50-facher Vergrößerung. Prozessparameter: 140 °C, 40 kN, 2 Sekunden.

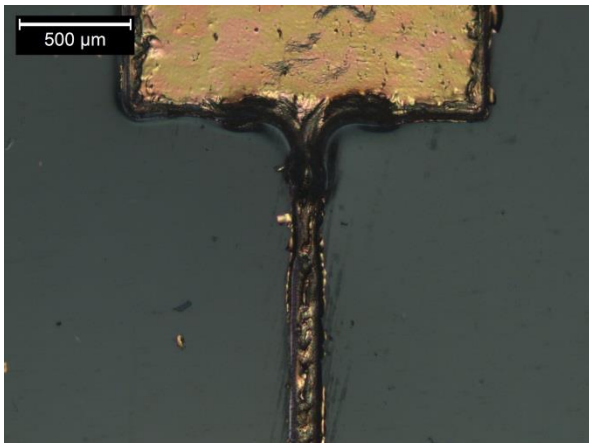


Abb. 6.3: Aufnahme mit dem Leica-Mikroskop der mit dem **Messingprägewerkzeug** geprägten Linie 1 der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** mit 50-facher Vergrößerung. Prozessparameter: 120 °C, 40 kN, 5 Sekunden.

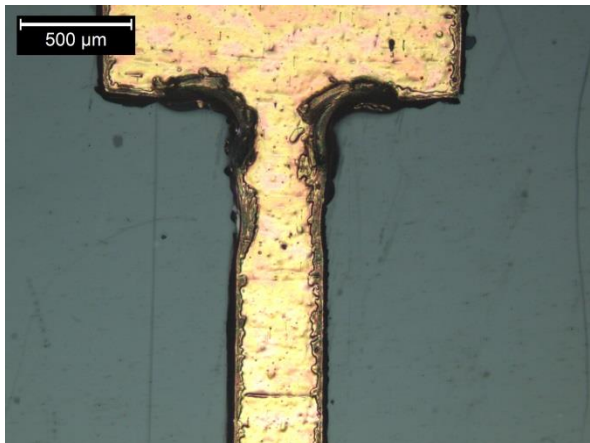


Abb. 6.4: Aufnahme mit dem Leica-Mikroskop der mit dem **Messingprägewerkzeug** geprägten Linie 12 der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** mit 50-facher Vergrößerung. Prozessparameter: 140 °C, 40 kN, 1 Sekunden.

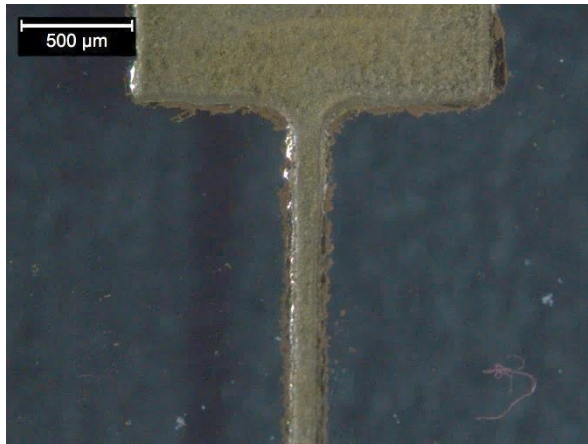


Abb. 6.5: Aufnahme mit dem Leica-Mikroskop der mit dem **Stahlprägewerkzeug** geprägten Linie 1 der Prägefolie **HS 19-3** mit 50-facher Vergrößerung. Prozessparameter: 100 °C, 40 kN, 1 Sekunden.

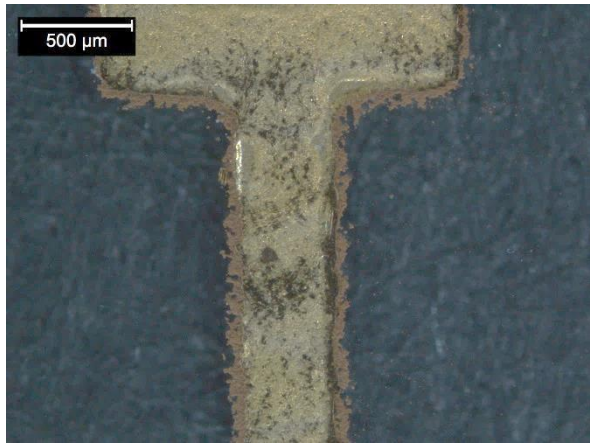


Abb. 6.6: Aufnahme mit dem Leica-Mikroskop der mit dem **Stahlprägewerkzeug** geprägten Linie 12 der Prägefolie **HS 19-3** mit 50-facher Vergrößerung. Prozessparameter: 120 °C, 40 kN, 20 Sekunden.

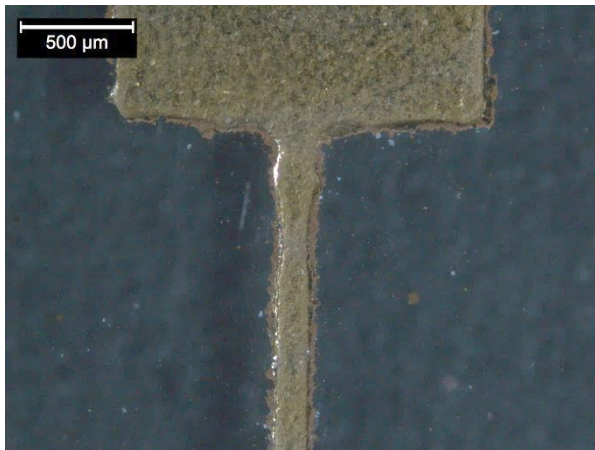


Abb. 6.7: Aufnahme mit dem Leica-Mikroskop der mit dem **Messingprägewerkzeug** geprägten Linie 1 der Prägefolie **HS 19-3** mit 50-facher Vergrößerung. Prozessparameter: 100 °C, 40 kN, 2 Sekunden.

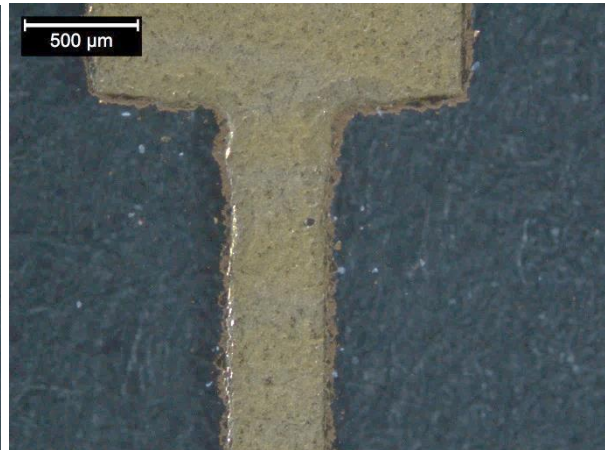


Abb. 6.8: Aufnahme mit dem Leica-Mikroskop der mit dem **Messingprägewerkzeug** geprägten Linie 12 der Prägefolie **HS 19-3** mit 50-facher Vergrößerung. Prozessparameter: 120 °C, 40 kN, 1 Sekunden.

Die Aufnahmen in Abb. 6.2, Abb. 6.3 und Abb. 6.6 zeigen die Inhomogenität (visuelle Ungleichmäßigkeit) der geprägten Schichten. Außerdem sind einige Konturen (z. B. Vierecke und rundes Muster), die während des Gravierprozesses auf der Oberfläche der Prägewerkzeuge entstanden sind, bei den geprägten Strukturen (rundes Muster siehe Abb. 6.2 und vergleiche Abb. 4.6 und Abb. 4.8 auf Seite 46) zu sehen.

Zusätzlich weisen die geprägten Linien unterschiedliche Kantenrauheit (Abb. 6.1, Abb. 6.3 und Abb. 6.5) auf. Vor allem kann dies bei den schmalen Linien 1-10 festgestellt werden. Ein extremes Beispiel ist bei manchen geprägten Linien, wie in Abb. 6.9, zu beobachten.

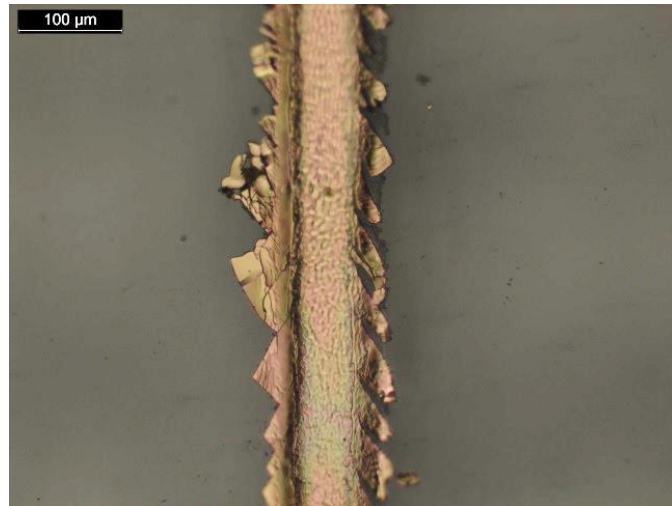


Abb. 6.9: Aufnahme mit dem Leica-Mikroskop der mit dem **Stahlprägewerkzeug** geprägten Linie 1 der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** mit 200-facher Vergrößerung. Prozessparameter: 100 °C, 40 kN, 2 Sekunden.

Aus den Ergebnissen der mikroskopischen Untersuchung der Prägegüter folgt, dass die Qualität der gravierten Prägestrukturen der Prägewerkzeuge einen Einfluss auf die Prägeergebnisse hat. Die geprägten Strukturen geben im Wesentlichen die Formen der Prägestrukturen der Prägewerkzeuge wieder.

Die Ursache für die die Kantenrauheit kann an den fehlenden Abkühlzeiten und dem Abziehen des Polyesterträgers liegen. Ein weiterer Faktor kann durch das Umformen der Prägefolie beim Einprägen in das Substrat sein (deutlicher bei schmalen geprägten Linien zu sehen, siehe Abb. 6.10). Dabei kann es aufgrund der hohen Prägetemperatur zu einer weiteren, wellenförmigen Verformung der Prägefolie kommen. Hierdurch wird die Klebeschicht nicht gleichmäßig mit dem Substrat verbunden. Beim Abziehen des Polyesterträgers können die Transferschichten der Prägefolie durch die inhomogene Verklebung ungleichmäßig abgetrennt werden, wodurch raue Kanten entstehen.

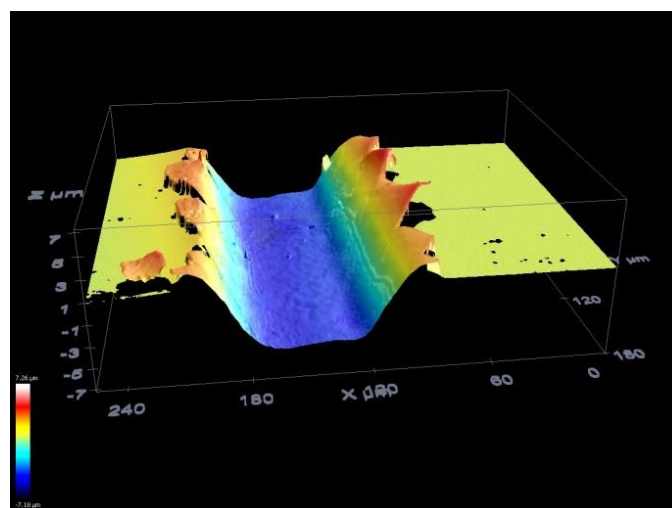


Abb. 6.10: Sensofar-Aufnahme (konfokal) der mit dem **Stahlprägewerkzeug** geprägten Linie 1 der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355**. Prozessparameter: 100 °C, 40 kN, 2 Sekunden. Der unterste Bereich auf der z-Skala (linke Ecke): dunkel blau hat den Wert -7,18 µm, der oberste Bereich in weiß hat den Wert 7,26 µm.

Solche Effekte, wie fehlende Stellen und Inhomogenität (Ungleichmäßigkeit) der Schichten, bei den geprägten Strukturen sind vor allem auf die Bearbeitungsqualität der Prägewerkzeuge, und die Prozessparameter, wie Prägetemperatur, Anpressdruck und Prägezeit, während des Prägefoliendruckvorgangs zurückzuführen, da die beiden Prägefolien bei der REM-Untersuchung (siehe Abschnitt 4.3) relativ homogene Schichten aufweisen.

6.4 Schichtdicke und Oberflächenrauheit der geprägten Strukturen

Die Schichtdicken der geprägten Strukturen und ihre Oberflächenrauheit R_a werden am Beispiel einiger ausgesuchter Prägegüter mit Hilfe des Profilometers Sensofar Plu Neox untersucht.

Die Messergebnisse mit dem Profilometer Sensofar Plu Neox sind in Abb. 6.11 und Abb. 6.12 am Beispiel der zwei geprägten Linien der beiden Prägefolien mit den beiden Prägewerkzeugen mit 10-facher Vergrößerung dargestellt. Die Profile der jeweils mit schwarzer Linie gekennzeichneten Messbereiche sind in Abb. 6.13 und Abb. 6.14 zu sehen.

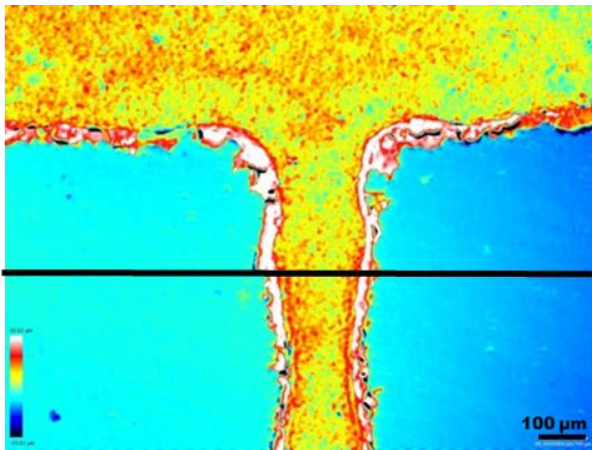


Abb. 6.11: Sensofar-Aufnahme (konfokal) der mit dem **Messingprägewerkzeug** geprägten Linie 3 der Prägefolie **HS 19-3**. Prozessparameter: 120 °C, 40 kN, 2 Sekunden. Der unterste Bereich auf der Skala (linke Ecke): dunkel blau hat den Wert -10,61 µm, der oberste Bereich in weiß 10,61 µm. 10-fache Vergrößerung.

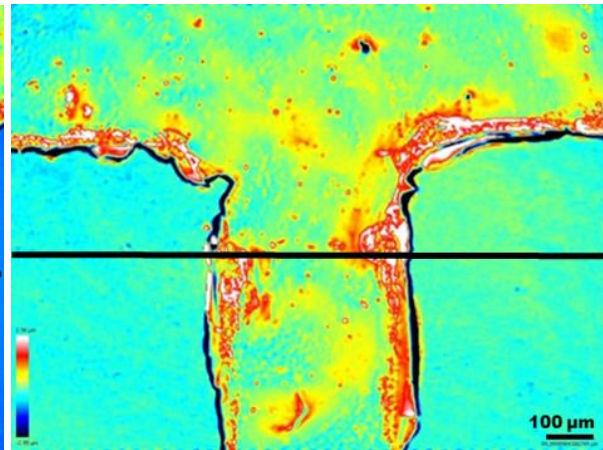


Abb. 6.12: Sensofar-Aufnahme (konfokal) der mit dem **Stahlprägewerkzeug** geprägten Linie 13 der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355**. Prozessparameter: 140 °C, 40 kN, 2 Sekunden. Der unterste Bereich auf der Skala (linke Ecke): dunkel blau hat den Wert -2,95 µm, der oberste Bereich in weiß 2,96 µm. 10-fache Vergrößerung.

In Abb. 6.13 und Abb. 6.14 ist zu sehen, dass die Kanten (Spitzen in Abb. 6.13 und Abb. 6.14) der geprägten Linien über der PET-Folie-Ebene und der übertragenen Transferschichten der Prägefolie in der Mitte (Bereich zwischen den Spitzen in Abb. 6.13 und Abb. 6.14) liegen.

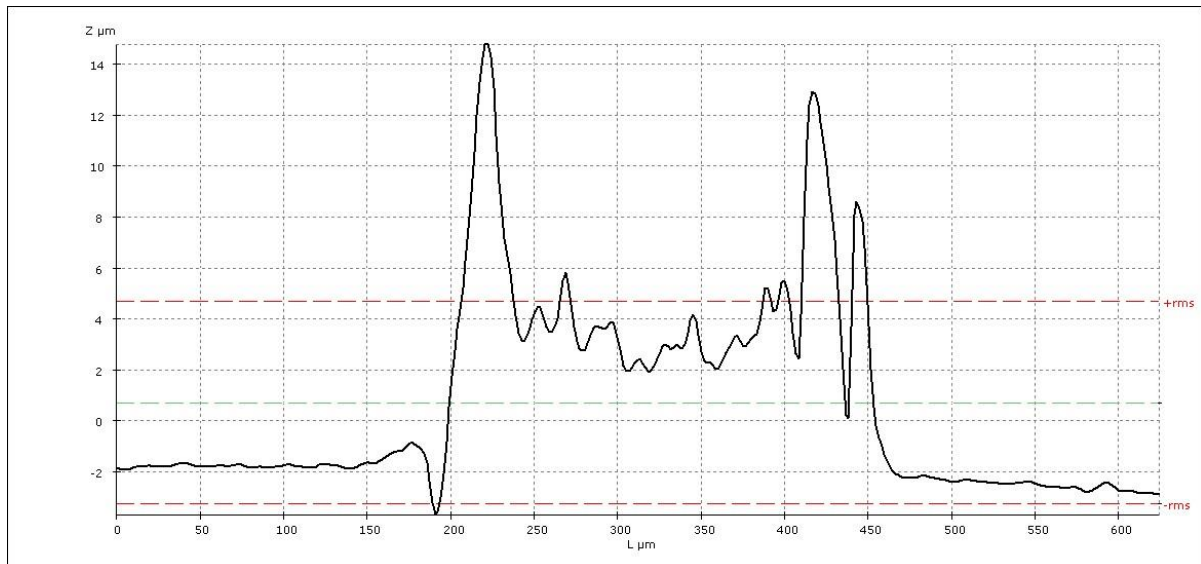


Abb. 6.13: Profil der mit dem **Messingprägewerkzeug** geprägten Linie 3 der Prägefolie **HS 19-3** entsprechend in Abb. 6.11 schwarz gekennzeichneten Linie. Prozessparameter: 120 °C, 40 kN, 2 Sekunden.

Die Ursache dafür ist, dass die Kanten der Prägefolie, die nach dem Übertrag der Transferschichten beim Abziehen der Polyesterträgers entstehen, keinen ausreichenden Kontakt mit der PET-Folie haben und sich teilweise senkrecht zur PET-Folie-Ebene befinden (siehe Abb. 6.15 und Abb. 5.16). Außerdem kann ein möglicher Fehler bei den dargestellten Ergebnissen während des Ausgleichs der PET-Folie-Ebene mit dem Sensofar-Auswertungsprogramm SensoSCAN Version 3.1.2.16 [SEN13] entstehen. Da die Prägefolien bei höheren Prägetemperaturen übertragen werden, zeigen sich unerwünschte Wirkungen auf dem Substrat. Die PET-Folie verzieht sich beispielsweise je nach Prägetemperatur unterschiedlich. Dieser Effekt kann durch das manuelle Aufzeigen der partiellen Substartebene im Sensofar-Auswertungsprogramm SensoSCAN minimiert und die Welligkeit der Prägegüter teilweise ausgeglichen werden.

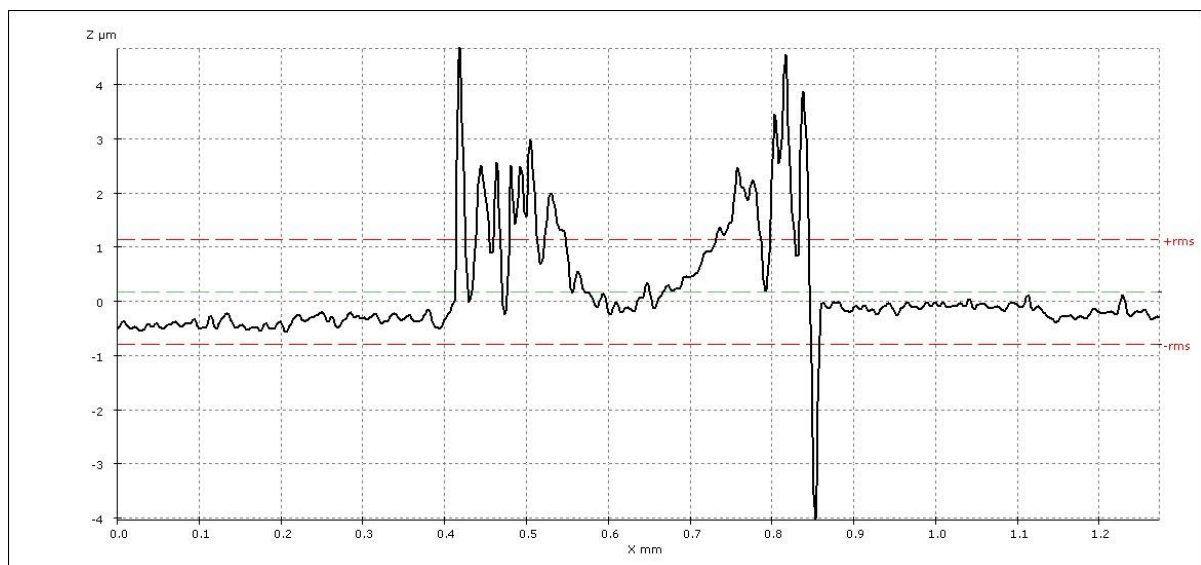


Abb. 6.14: Profil der mit dem **Stahlprägewerkzeug** geprägten Linie 13 der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** entsprechend in Abb. 6.12 schwarz gekennzeichneten Linie. Prozessparameter: 140 °C, 40 kN, 2 Sekunden.

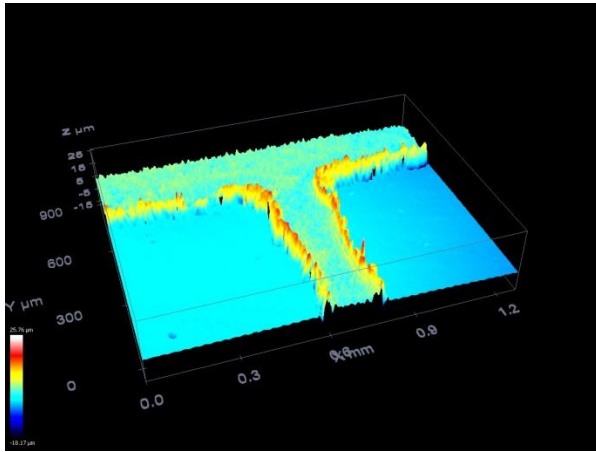


Abb. 6.15: Sensofar-Aufnahme (konfokal) der mit dem **Messingprägewerkzeug** geprägten Linie 3 der Prägefolie **HS 19-3**. Prozessparameter: 120 °C, 40 kN, 2 Sekunden. Der unterste Bereich auf der Skala (linke Ecke): dunkel blau hat den Wert -18,17 μm , der oberste Bereich in weiß 25,76 μm . 10-facher Vergrößerung.

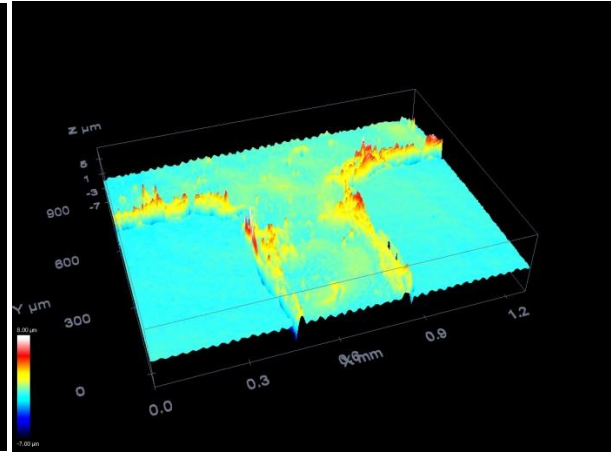


Abb. 6.16: Sensofar-Aufnahme (konfokal) der mit dem **Stahlprägewerkzeug** geprägten Linie 13 der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355**. Prozessparameter: 140 °C, 40 kN, 2 Sekunden. Der unterste Bereich auf der Skala (linke Ecke): dunkel blau hat den Wert -7,00 μm , der oberste Bereich in weiß 8,00 μm . 10-facher Vergrößerung.

Eine Bestimmung der tatsächlichen Dicke der übertragenen Schichten der Prägefolien ist mit optischen Verfahren trotzdem nicht zielführend, zumal zahlreiche systematische Fehlerquellen der Messmethode berücksichtigt werden müssen. Aus den Messungen sind nur Orientierungswerte für die Schichtdicken der auf dem Substrat verbleibenden Schichten der Prägefolien abzuleiten. Die Schichtdicke der Prägefolie Luxor GTS Premium 355 liegt bei ca. 2 μm (Abb. 6.14), der Prägefolie HS 19-3 bei ca. 8 μm (Abb. 6.13). Den Ergebnissen für die gesamten Schichtdicken der beiden Prägefolien zur Folge (die Luxor GTS Premium 355 hat die Schichtdicke 23 μm , die HS 19-3 hat 34 μm , siehe Abschnitt 4.3.3), mit dem Polyesterträger beim Abziehen der Resten der Prägefolie nach dem Prägefoliendruckvorgang verbleiben ca. 21 μm der Prägefolie Luxor GTS Premium 355 und ca. 26 μm der Prägefolie HS 19-3.

Der Versuch, die Dicke der übertragenen Schichten der Prägefolien mit dem REM-Mikroskop JSM 6610LV zu bestimmen, bringt keine verwertbaren Ergebnisse. Die Dicken der einzelnen Schichten, wie Klebeschicht, Metallisierung oder Schutzschicht, können mit der am IDD vorhandenen Messtechnik ebenfalls nicht bestimmt werden. Das Problem liegt an der Schwierigkeit beim Unterscheiden der einzelnen Schichten und derer Grenzen untereinander, die nicht eindeutig festgelegt werden können. Ein Beispiel ist in Abb. 6.17 zu sehen.

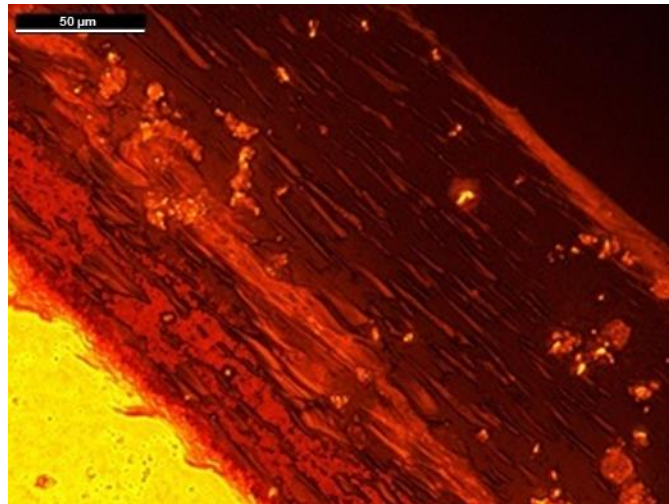


Abb. 6.17: Leica-Aufnahme eines senkrechten Prägegutschnitts der Prägefolie HS 19-3.

Die Oberflächenrauheit der geprägten Strukturen kann in Abb. 6.13 und Abb. 6.14 betrachtet werden. Deren Bestimmung ist ebenfalls durch die Deformationen im Substrat und in der Prägefolie selbst unmöglich.

Trotz des fehlenden exakten Werts der auf dem Substrat verbleibenden Schichtdicken und der Oberflächenrauheit R_a der untersuchten Prägefolien konnte neue Erkenntnisse über das Befinden der Transferschichten der Prägefolie auf dem Substrat und deren Kanten gewonnen werden. Außerdem besteht nun ein Richtwert über die Dimension, in der die Schichtdicke der auf dem Substrat verbleibenden Prägefolie liegt.

Abgesehen davon, dass die einzelnen Schichtdicken der Prägefolien nicht bestimmt werden konnten, ist deren exakter Wert für die Anwendung der Prägefolien im Elektronikbereich nicht entscheidend. Relevanter für die elektrischen Eigenschaften der geprägten Strukturen ist die Dicke der Metallisierung. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Metallisierung bei jedem Prägegut (ausschließlich fehlender Stellen der Prägefolie) vollständig auf das Substrat übertragen wird, da das Trennen der Transferschichten der Prägefolie vom Polyesterträger im Bereich der Ablöseschicht erfolgt. Deren exakte Bestimmung ist allerdings auch nicht unbedingt notwendig, da für die elektronischen Bauteile die elektrischen Eigenschaften entscheidend sind und sie mittels anderer Verfahren, wie z. B. durch das Vermessen des elektrischen Widerstands, charakterisiert werden können. Die exakten Schichtdicken und Oberflächenrauheit R_a können dann relevant sein, wenn das Aufbringen von weiteren zusätzlichen Schichten vorgesehen wird.

6.5 Strukturgröße: Linienstärke

Um die Auflösung bzw. die Größe der geprägten Strukturen und ihre Veränderung in Abhängigkeit von den jeweiligen Eingangsparametern nachzuvollziehen, werden ähnlich den Prägewerkzeugen (siehe Abschnitt 4.2.3) die Linienstärken L_{pl} der geprägten Strukturen vermessen. Die Länge der Linien und die Größe der Kontaktflächen werden nicht überprüft.

Die Veränderung der Linienstärke L_{pl} kann am besten durch die Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ in Bezug auf die Linienstärken L_{pw} auf den jeweiligen Prägewerkzeugen für jede Linie ausgedrückt werden. Sie wird wie folgt berechnet:

$$Z_{pl,pw} = \frac{L_{pl} - L_{pw}}{L_{pw}} \times 100 \%, \quad (6.1)$$

wo L_{pl} – die geprägte Linienstärke, L_{pw} – die Linienstärke auf dem Prägewerkzeug ist.

Um die Veränderung der geprägten Linienstärken L_{pl} in Bezug auf die Layoutwerte L_{Layout} nachzuverfolgen, wird die Linienstärkenzunahme $Z_{pl,Layout}$ (engl. „line width gain“) berechnet:

$$Z_{pl,Layout} = \frac{L_{pl} - L_{Layout}}{L_{Layout}} \times 100 \%. \quad (6.2)$$

Die beiden Charakteristiken $Z_{pl,pw}$ und $Z_{pl,Layout}$ der geprägten Linien können sowohl positiv, bei breiteren geprägten Linien als es auf dem Prägewerkzeug graviert/im Layout vorgegeben ist, als auch negativ, bei schmälere geprägten Linien, sein. Sie sind außerdem vergleichbar mit der Tonwertzunahme der Druckpunkte bei den konventionellen Druckverfahren (nach [KIP00]).

6.5.1 Messungen und Auswertung

Mittels des Multiaufnahme-Modus (ein Aufnahmebild von mit voreingestellter Anzahl mehreren Messungen) des Mikroskops Leica DM4000M werden die geprägten Strukturen jedes Prägegutes nach Tabelle 6.2 auf Seite 93 (insgesamt 1216 Linien der 64 Prägegüter) mit der 50-fachen Vergrößerung in nur zwei Messschritten einmalig aufgenommen. Eine Beispielaufnahme ist in Abb. 6.18 dargestellt.

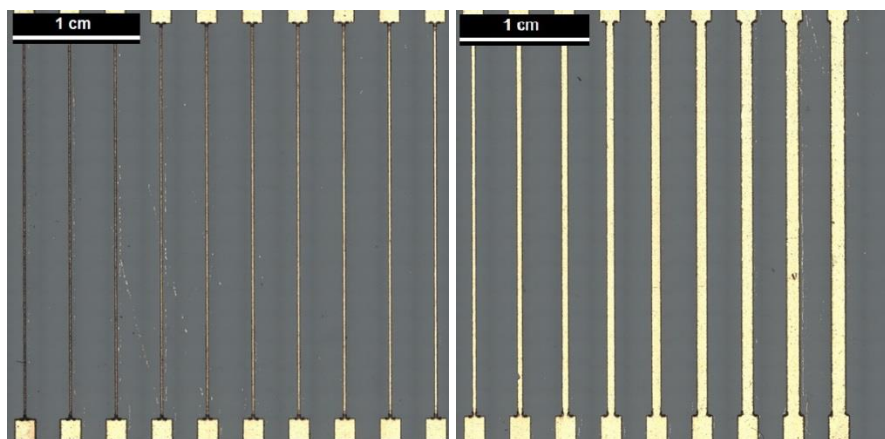


Abb. 6.18: Multiaufnahme mit dem Leica-Mikroskop des mit dem **Stahlprägewerkzeug** geprägten Prägegutes: Prägefolie **Luxor GTS Premium 355**, 120 °C, 40 kN und 2 Sekunden. 50-fache Vergrößerung.

Die Prägefolie Luxor GTS Premium 355 liefert bei den Messungen im Auflichtmodus (siehe Abb 6.1 bis Abb. 6.4 auf Seite 95) und die Prägefolie HS 19-3 – im Dunkelfeldmodus (siehe

Abb. 6.5 bis Abb. 6.8 auf Seite 96) die besten Ergebnisse, da dabei die Konturen der geprägten Linien vom Substrat und den Klebeschichtresten am besten zu unterscheiden sind.

Im nächsten Schritt werden die Linienstärken L_{pl} der einzelnen geprägten Linien mit dem Leica-Auswertungsprogramm LAS vermessen. Die Messungen werden für jede geprägte Linie im gleichen Abschnitt (siehe Abb. 6.19) jeweils drei Mal durchgeführt.

Dabei beträgt die Messunsicherheit, die durch den Messprozess entsteht und durch jeweils fünf wiederholte Messungen an ein und derselben Messstelle mit den beiden Objektiven am Leica-Mikroskop bestimmt ist, nur 0,43 % (als Standardabweichung der Messwerte der fünf Messungen zu Mittelwert L_{pl} berechnet).

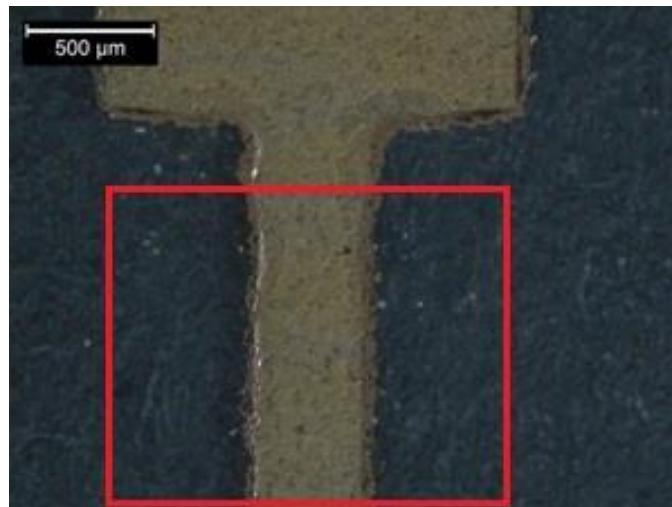


Abb. 6.19: Aufnahme mit dem Leica-Mikroskop der mit dem **Messingprägewerkzeug** geprägten Linie 12 der Prägefolie **HS 19-3** mit 50-facher Vergrößerung. Prozessparameter: 120 °C, 40 kN, 1 Sekunden. Mit rotem Rahmen ist der Abschnitt, in welchem die Messungen durchgeführt werden, gekennzeichnet.

Der Messvorgang ist vor allem durch die Kantenrauheit und unklare Grenzen der geprägten Linien erschwert (Beispiele siehe Abb. 6.1 bis Abb. 6.9 auf Seiten 95-97). Daher werden die Linien an drei unterschiedlichen zufällig ausgewählten Stellen im erwähnten Abschnitt vermessen (Abb. 6.19).

Durch diese Vermessung der Werte L_{pl} für jede geprägte Linie und durch die nachfolgende Berechnung derer Standardabweichung in Bezug auf die Linienstärken im Layout L_{Layout} können die Mess- und Prozessunsicherheit (Begriffsdefinition nach [DGQ12, MSA10, VDA10], vergleiche Abschnitt 4.2.3) ausgedrückt werden. Ein über alle 64 Prägegüter nach Tabelle 6.2 auf Seite 93 (separat für jede Linie) gemittelter Wert für die Mess- und Prozessunsicherheit ist in Abb. 6.20 dargestellt. Die einzelnen Werte sind für eine bessere Sichtbarkeit mit Linien verbunden.

Die in Abb. 6.20 gezeigten Werte weisen auf eine mögliche Abweichung der Linienstärken L_{pl} vom vorgegebenen L_{Layout} -Wert, die durch die Kantenrauheit der geprägten Linien, die Prozessunsicherheit des Gravierens der Prägewerkzeuge und den Fehler beim Vermessen der Linienstärken L_{pl} entsteht. Die mittlere Mess- und Prozessunsicherheit liegt für die Linien 1-10 teilweise über 140 %. Unter 10 % ist sie nur ab der Linie 11 zu beobachten.

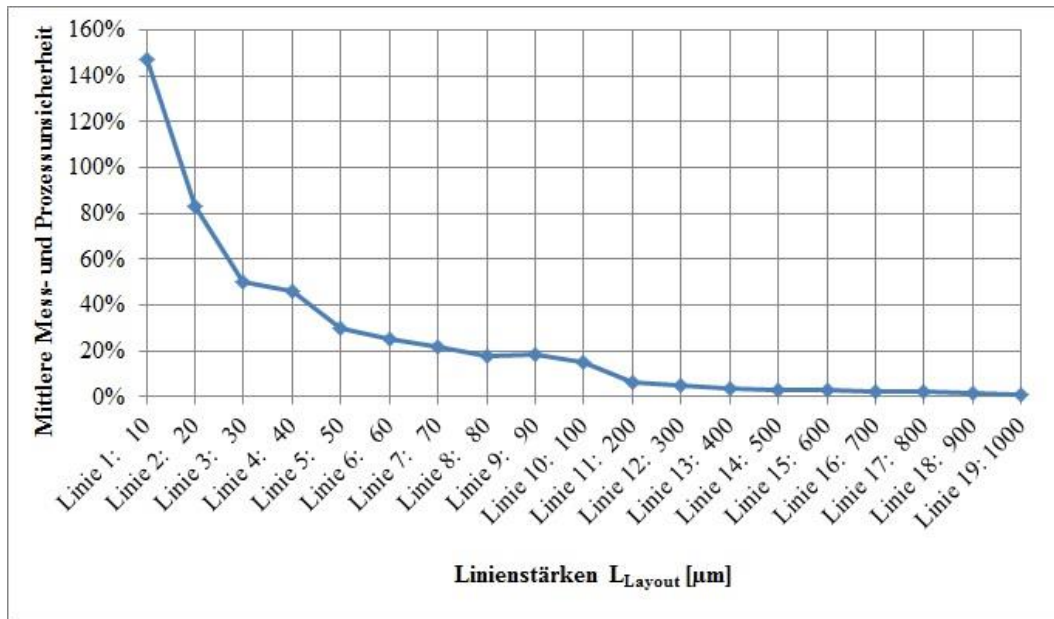


Abb. 6.20: Mittlere Mess- und Prozessunsicherheit aller geprägten Linien in Bezug auf die vorgegebenen im Layout Linienstärken L_{Layout} , die durch die Kantenrauheit und Messungenauigkeit entsteht.

Des Weiteren werden die Linienstärken L_{pl} für einzelne Eingangsparameter getrennt ausgewertet. Zuerst werden die Werte nach Prägewerkzeugen und Prägefolien getrennt und danach für die verschiedenen Soll-Temperaturen bei drei Prägezeiten (2 s, 5 s, 10 s) und beim konstanten Anpressdruck 40 kN bearbeitet. Damit kann die Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ in Abhängigkeit von der Soll-Temperatur für jede Prägefolie und jedes Prägewerkzeug nachvollzogen werden.

Eine ähnliche Auswertung wird für die Prägezeiten durchgeführt. Dabei sind die Soll-Temperatur (140 °C bei der Prägefolie Luxor GTS Premium 355 und 120 °C bei der Prägefolie HS 19-3) und der Anpressdruck (40 kN) konstant, die Prägezeit beträgt jeweils 2 s, 5 s, 10 s, 15 s und 20 s.

Zur Bestimmung des Anpressdruckeinflusses auf die Prägeergebnisse bleiben die Soll-Temperatur und die Prägezeit konstant. Für die Prägefolie Luxor GTS Premium 355 sind es 140 °C bei 15 Sekunden Prägezeit, für die Prägefolie HS 19-3 – 120 °C ebenfalls bei 15 Sekunden. Der Anpressdruck ist 30 kN, 35 kN und 40 kN.

Um eine Erkenntnis über die Linienstärkenzunahme $Z_{pl,Layout}$ der geprägten Linien in Bezug auf die Layoutwerte L_{Layout} zu bekommen, werden außerdem die Werte $Z_{pl,Layout}$ für einige der aufgezählten Fälle berechnet.

Die ermittelten Werte $Z_{pl,pw}$ und $Z_{pl,Layout}$ werden auf allen Diagrammen für eine bessere Sichtbarkeit und das Auseinandertrennen der Ergebnisse mit Linien verbunden.

6.5.2 Variierung der Soll-Temperatur

6.5.2.1 Prägefolie Luxor GTS Premium 355

In den folgenden Diagrammen sind die Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ und $Z_{pl,Layout}$ der geprägten Linien in Bezug auf die Linienstärken L_{pw} auf den jeweiligen Prägewerkzeugen (Messwerte siehe Anhang 3) und auf dem Layout L_{Layout} dargestellt.

In Abb. 6.21 sind die Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ beim Prägefoliendruck der Prägefolie Luxor GTS Premium 355 mit dem Messingprägewerkzeug in Abhängigkeit von den fünf Soll-Temperaturen dargestellt. Dabei ist zu sehen, dass die Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ der geprägten Linien beim Prägefoliendruck mit dem Messingprägewerkzeug bis zu 60 % beträgt. Ab der Linie 11 sinken die Linienstärkenzunahmen im Prägefoliendruck unter 40 % und nähern sich 0 %.

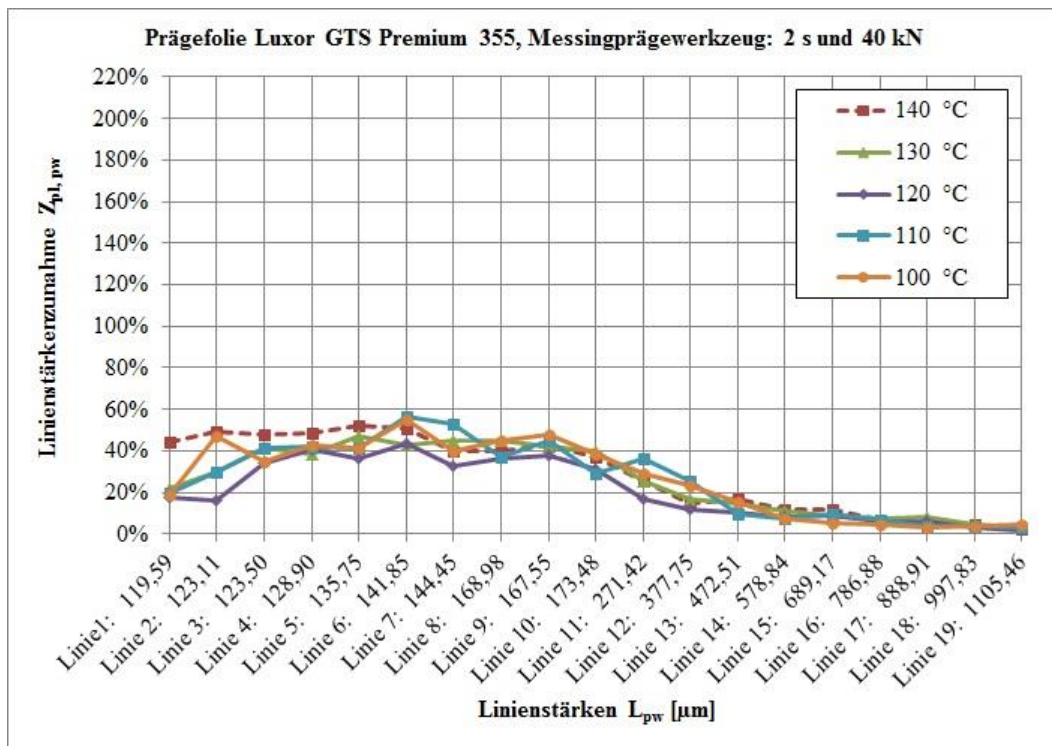


Abb. 6.21: Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ (nach Gleichung 6.1 auf Seite 102) der geprägten Linien der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** in Bezug auf die gravierten Linien des **Messingprägewerkzeuges**. Soll-Temperatur: 100 °C, 110 °C, 120 °C, 130 °C, 140 °C; Prägezeit: 2 s; Anpressdruck: 40 kN.

Eine Schwankung in den Werten kann bei den dünnen Linien 1-10 beobachtet werden. Diese Schwankung kann überwiegend auf die Prozessunsicherheit des Prägefoliendrucks, die durch raue Kanten der geprägten Linien und die Schwierigkeiten bei deren Vermessen verursacht wird, zurückgeführt werden.

Eine eindeutige Tendenz für bei einer bestimmten Soll-Temperatur kann für die Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ nicht abgeleitet werden. Die Ergebnisse einer Auswertung für 5 und 10 Sekunden Prägezeit befinden sich in Anhang 11A. Diese zeigen ebenfalls keine

Tendenz der Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ beim Variieren der Soll-Temperatur an der GEBA 6.

Das Ergebnis beim Variieren der Soll-Temperaturen ist für die Linienstärkenzunahme $Z_{pl,Layout}$ in Bezug auf die Layoutwerte L_{Layout} in Abb. 6.22 zu beobachten.

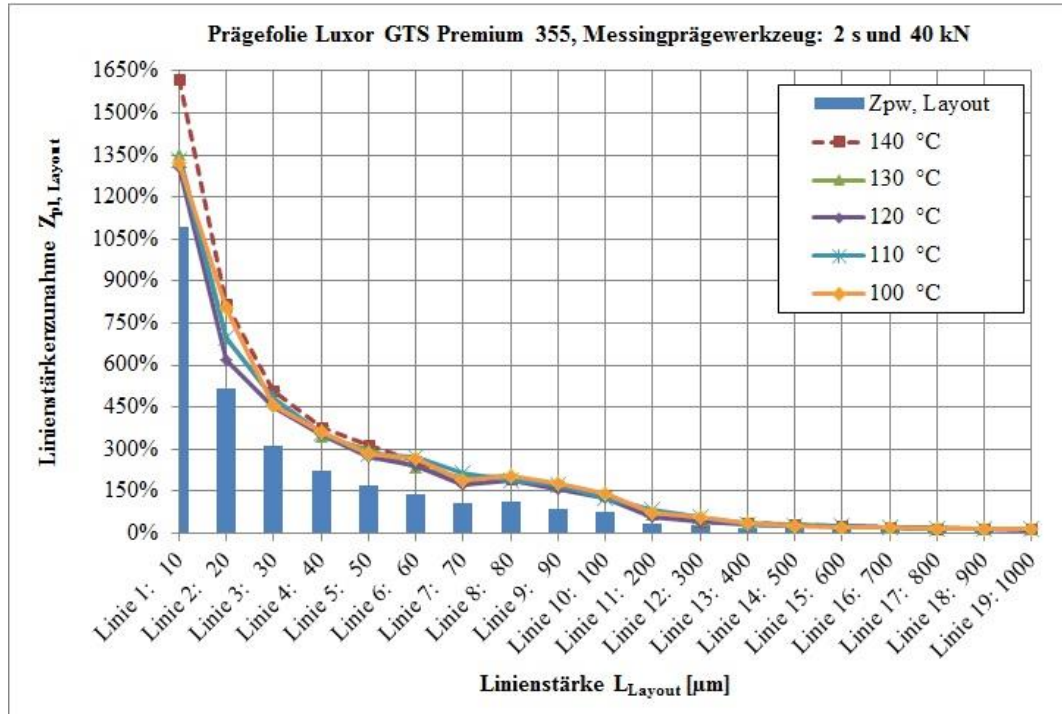


Abb. 6.22: Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,Layout}$ (nach Gleichung 6.2 auf Seite 102) der geprägten Linien der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** in Bezug auf die vorgegebenen Linienstärken L_{Layout} im Layout. Soll-Temperatur: 100 °C, 110 °C, 120 °C, 130 °C, 140 °C; Prägezeit: 2 s; Anpressdruck: 40 kN. $Z_{pw,Layout}$ bildet die Zunahme der Linienstärken auf dem **Messingprägewerkzeug**, die durch den Gravierprozess entsteht, ab.

Die Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$, die während des Prägefoliendrucks entsteht, ist zusammen mit der Linienstärkezunahme $Z_{pw,Layout}$, die durch den Gravierprozess des Messingprägewerkzeuges zu Stande kommt, als Linienstärkenzunahme $Z_{pl,Layout}$ dargestellt. Aus dieser Darstellung ist abzuleiten, dass der Gravierprozess des Messingprägewerkzeuges den größeren Einfluss auf die geprägten Linienstärken L_{pl} in Bezug auf die Layoutwerte L_{Layout} als der Prägefoliendruck selbst hat.

Abb. 6.23 stellt die ähnlichen Ergebnisse der Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ für die Prägefolie Luxor GTS Premium 355 beim Prägefoliendruck mit dem Stahlprägewerkzeug dar. Dabei liegen die Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ bei 160 % und sinken mit Erhöhung der Linienstärken L_{pw} auf unter 5 % ab. Ab der Linie 11 ist die Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ überwiegend unter 40 %.

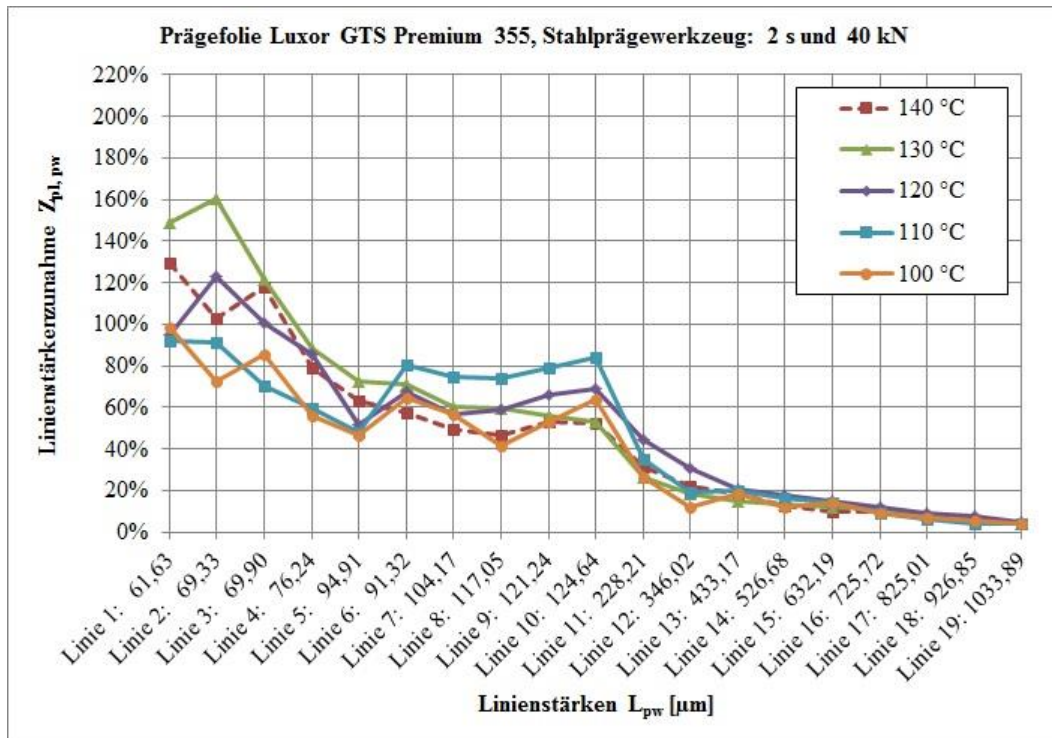


Abb. 6.23: Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ (nach Gleichung 6.1 auf Seite 102) der geprägten Linien der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** in Bezug auf die gravierten Linien des **Stahlprägewerkzeuges**. Soll-Temperatur: 100 °C, 110 °C, 120 °C, 130 °C, 140 °C; Prägezeit: 2 s; Anpressdruck: 40 kN.

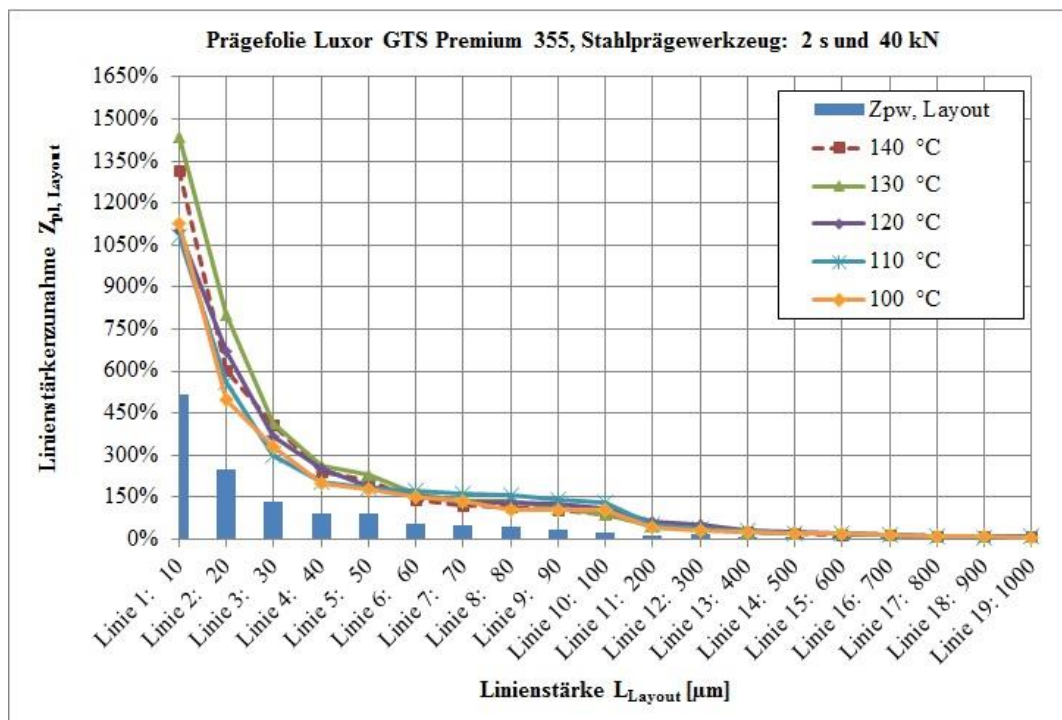


Abb. 6.24: Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,Layout}$ (nach Gleichung 6.2 auf Seite 102) der geprägten Linien der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** in Bezug auf die vorgegebenen Linienstärken L_{Layout} im Layout. Soll-Temperatur: 100 °C, 110 °C, 120 °C, 130 °C, 140 °C; Prägezeit: 2 s; Anpressdruck: 40 kN. $Z_{pw,Layout}$ bildet die Zunahme der Linienstärken auf dem **Stahlprägewerkzeug**, die durch den Gravierprozess entsteht, ab.

Größte Schwankungen in den Werten bei den verschiedenen Soll-Temperaturen können bei den Linien 1-10 beobachtet werden. Dieses kann ebenfalls größtenteils auf die Prozessunsicherheit des Prägefoliendrucks zurückgeführt werden. Die Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ ab der Linie 11 bei allen fünf Soll-Temperaturen verlaufen relativ synchron. Die Auswertung für die Prägefolie Luxor GTS Premium 355 bei 5 Sekunden und 10 Sekunden Prägezeit mit dem Stahlprägewerkzeug befindet sich in Anhang 11B, die ebenfalls eine ähnliche Erkenntnis liefert.

In Abb. 6.24 ist das Ergebnis beim Variieren der Soll-Temperaturen mit der Linienstärkenzunahme $Z_{pw,Layout}$, die beim Gravierprozess des Stahlprägewerkzeuges entsteht, zu sehen. Dabei ist festzustellen, dass die Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ beim Prägefoliendruck gleich groß oder stellenweise höher als der entsprechende Wert für die Linienstärkenzunahme $Z_{pw,Layout}$ beim Gravieren des Stahlprägewerkzeuges ist.

6.5.2.2 Prägefolie HS 19-3

In Abb. 6.25 sind die Ergebnisse der Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ für die Prägefolie HS 19-3 beim Prägefoliendruck mit den verschiedenen Soll-Temperaturen und unter Verwendung des Messingprägewerkzeuges gezeigt.

Die Werte $Z_{pl,pw}$ liegen bei allen Soll-Temperaturen unter 60 %, ab der Linie 11 sinken sie unter 40 %.

Für die Linien 1-10 sind die unterschiedlichen Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ beim Variieren der Soll-Temperatur zu betrachten. Ähnlich, wie für die Prägefolie Luxor GTS Premium 355, liegt es an der Schwierigkeit mit der Bestimmung der Linienstärken L_{pl} aufgrund der Kantenrauheit.

Ab der Linie 11 verlaufen die Kurven in Abb. 6.25 relativ synchron. Daher ist ein deutlicher Einfluss der Soll-Temperatur auf die geprägten Linienstärken L_{pl} nicht nachzuvollziehen. Dies bestätigen ebenfalls die Ergebnisse bei 5 und 10 Sekunden Prägezeit (siehe Anhang 11C).

In Abb. 6.26 sind die gleichen Ergebnisse, wie in Abb. 6.25, bezogen auf die Linienstärke L_{Layout} im Layout dargestellt. Aus dieser Darstellung ist ersichtlich, dass der Gravierprozess des Messingprägewerkzeuges ($Z_{pw,Layout}$) einen größeren Einfluss auf die geprägten Linienstärken L_{pl} als der Prägefoliendruck ($Z_{pl,pw}$) selbst hat.

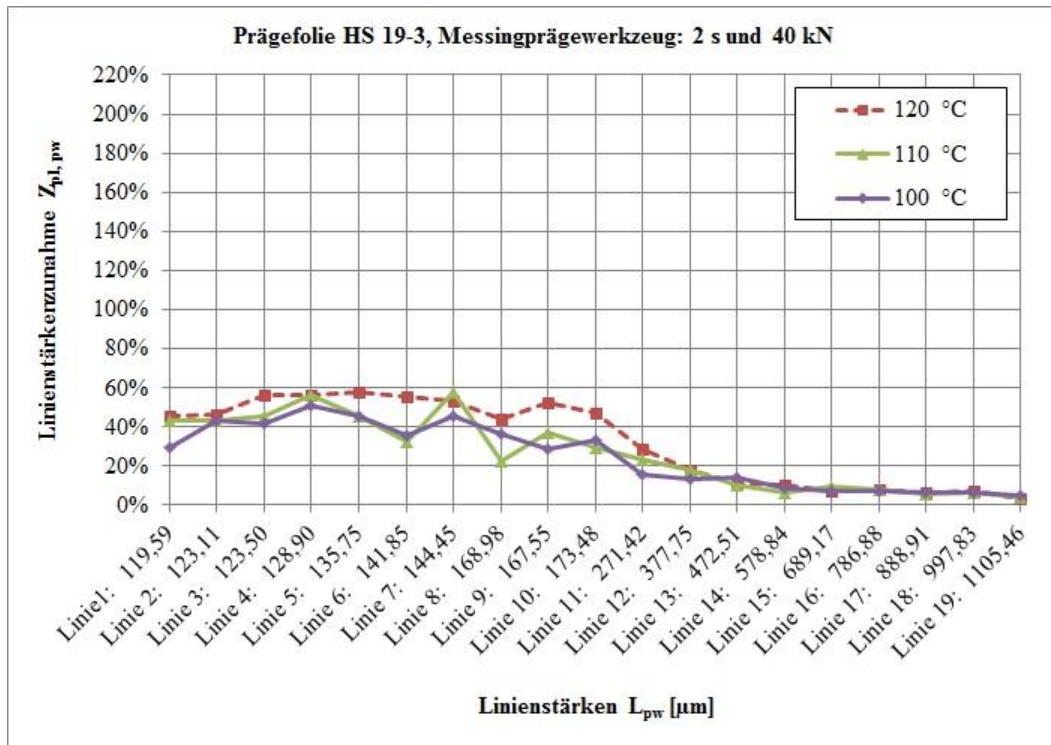


Abb. 6.25: Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ (nach Gleichung 6.1 auf Seite 102) der geprägten Linien der Prägefolie **HS 19-3** in Bezug auf die gravierten Linien des **Messingprägewerkzeuges**. Soll-Temperatur: 100 °C, 110 °C, 120 °C; Prägezeit: 2 s; Anpressdruck: 40 kN.

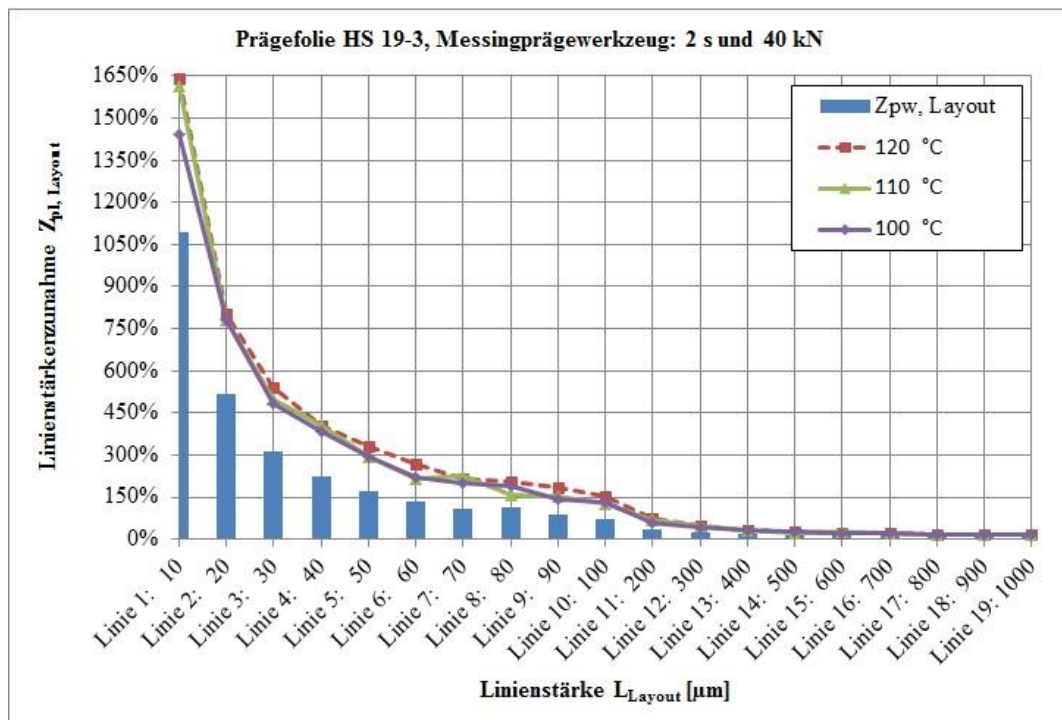


Abb. 6.26: Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,Layout}$ (nach Gleichung 6.2 auf Seite 102) der geprägten Linien der Prägefolie **HS 19-3** in Bezug auf die vorgegebenen Linienstärken L_{Layout} im Layout. Soll-Temperatur: 100 °C, 110 °C, 120 °C; Prägezeit: 2 s; Anpressdruck: 40 kN. $Z_{pw,Layout}$ bildet die Zunahme der Linienstärken auf dem **Messingprägewerkzeug**, die durch den Gravierprozess entsteht, ab.

In Abb. 6.27 sind die Verläufe der Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ bei den mit dem Stahlprägewerkzeug geprägten Linien der Prägefolie HS 19-3 für die Soll-Temperaturen von 100 °C, 110 °C und 120 °C dargestellt. Die Werte $Z_{pl,pw}$ steigen fast bis zu 150 %. Hier kann im Gegensatz zu den anderen Diagrammen eine Tendenz zur Erhöhung der Linienstärken L_{pl} mit der Steigerung der Soll-Temperatur gesehen werden. Die Verläufe für die Linien 1-10 sind nicht eindeutig und durch die Kantenrauheit der geprägten Linien beeinflusst. Ab der Linie 11 liegt die Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ unter 40 % und nähert sich 5 %. Die Ergebnisse für 5 und 10 Sekunden Prägezeit sind in Anhang 11D zu finden und zeigen im Vergleich mit dem Ergebnis für 2 Sekunden Prägezeit keine eindeutigen Tendenzen für eine bestimmte Soll-Temperatur.

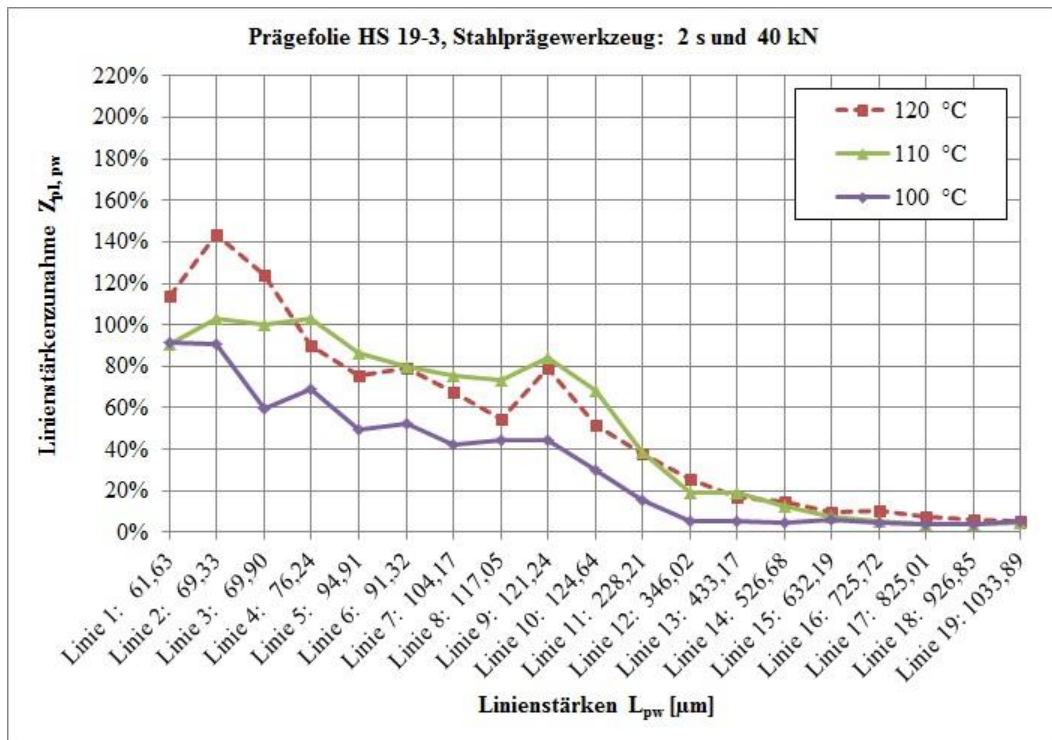


Abb. 6.27: Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ (nach Gleichung 6.1 auf Seite 102) der geprägten Linien der Prägefolie **HS 19-3** in Bezug auf die gravierten Linien des **Stahlprägewerkzeuges**. Soll-Temperatur: 100 °C, 110 °C, 120 °C; Prägezeit: 2 s; Anpressdruck: 40 kN.

In Abb. 6.28 sind die Ergebnisse für die Linienstärkenzunahme $Z_{pl,Layout}$ in Bezug auf die Linienstärken L_{Layout} , die im Layout vorgegeben sind, dargestellt. Die Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ übersteigt teilweise die entsprechenden Werte für die Linienstärkenzunahme $Z_{pw,Layout}$, welche beim Gravieren des Stahlprägewerkzeuges entsteht.

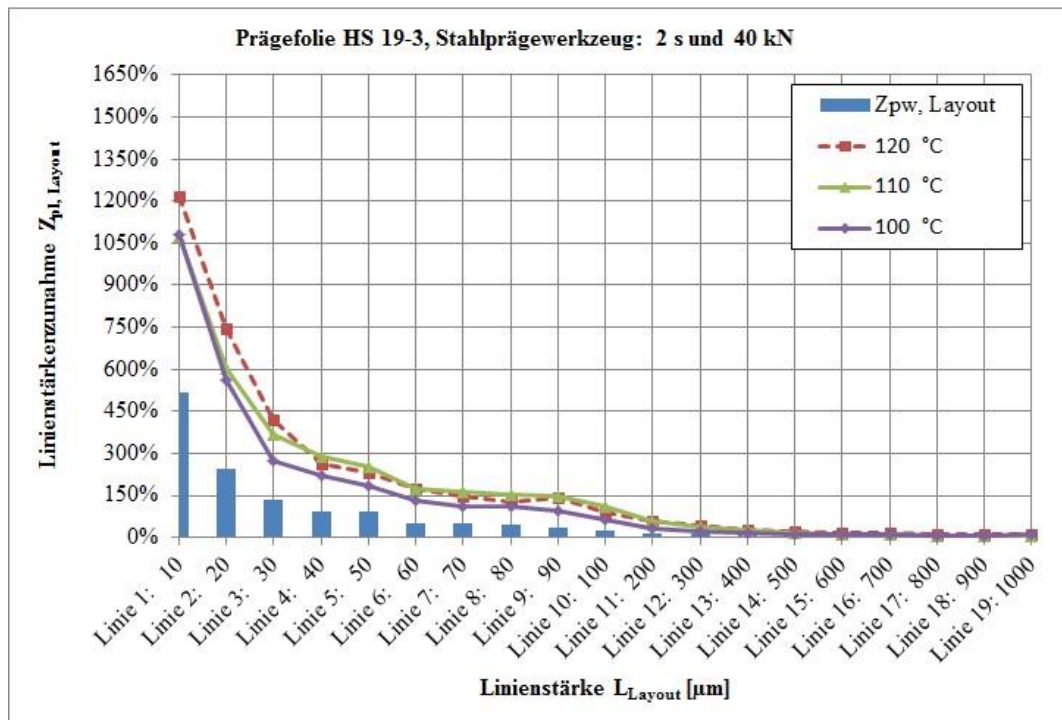


Abb. 6.28: Liniestärkenzunahmen $Z_{pl,Layout}$ (nach Gleichung 6.2 auf Seite 102) der geprägten Linien der Prägefolie HS 19-3 in Bezug auf die vorgegebenen Liniestärken L_{Layout} im Layout. Soll-Temperatur: 100 °C, 110 °C, 120 °C; Prägezeit: 2 s; Anpressdruck: 40 kN. $Z_{pw,Layout}$ bildet die Zunahme der Liniestärken auf dem Stahlprägewerkzeug, die durch den Gravierprozess entsteht, ab.

6.5.2.3 Zusammenfassung

Die vorgestellten Ergebnisse bei der Variierung der Soll-Temperaturen an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 zeigen, dass die geprägten Liniestärken L_{pl} keine eindeutigen Tendenzen bei einer Änderung der Soll-Temperatur zeigen. Die Verläufe der Liniestärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ unterschieden sich im Wesentlichen bei der Verwendung der unterschiedlichen Prägewerkzeuge. Beim Stahlprägewerkzeug nehmen die geprägten Linien bis zu 160 % in der Liniestärke L_{pl} im Vergleich zu Liniestärken L_{pw} auf dem Prägewerkzeug zu. Beim Messingprägewerkzeug liegt die Liniestärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ niedriger und übersteigt den Wert von 60 % nicht.

Die geprägten Linien 11-19 nehmen in der Liniestärke L_{pl} während des Prägefoliendrucks im Vergleich zur Liniestärken L_{pw} auf dem Prägewerkzeug höchstens um bis zu 40 % zu. Mit der weiteren Steigerung der Liniestärken L_{pw} nähern sich die Liniestärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ tendenziell 0 % an, unabhängig von Prägewerkzeug und Prägefolie. Generell ist ein Unterschied in den Liniestärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ beim Einsatz der verschiedenen Prägefolien nicht festzustellen.

Die Liniestärkezunahme $Z_{pl,Layout}$ bei den geprägten Linien in Bezug auf die Liniestärken L_{Layout} im Layout ist sehr durch den Gravierprozess des Messingprägewerkzeuges ($Z_{pw,Layout}$) beeinflusst. Beim Stahlprägewerkzeug ist der Einfluss des

Prägefoliendrucks ($Z_{pl,pw}$) im Durchschnitt höher als der vom Gravierprozess dieses Prägewerkzeuges ($Z_{pw,Layout}$).

Im Allgemeinen weisen die geprägten Linien 1-10 in den meisten Fällen raue Kanten auf. Dadurch ist die hohe Prozessunsicherheit während des Prägefoliendrucks für diese geprägten Linien zu begründen.

6.5.3 Variierung der Prägezeit

6.5.3.1 Prägefolie Luxor GTS Premium 355

Die Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ bei der Variierung der Prägezeit mit fester Soll-Temperatur und festem Anpressdruck für die Prägefolie Luxor GTS Premium 355 ist in Abb. 6.29 und in Abb. 6.30 grafisch dargestellt. Abb. 6.29 stellt die Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ der geprägten Linien beim Prägefoliendruck mit dem Messingprägewerkzeug und Abb. 6.30 mit dem Stahlprägewerkzeug dar.

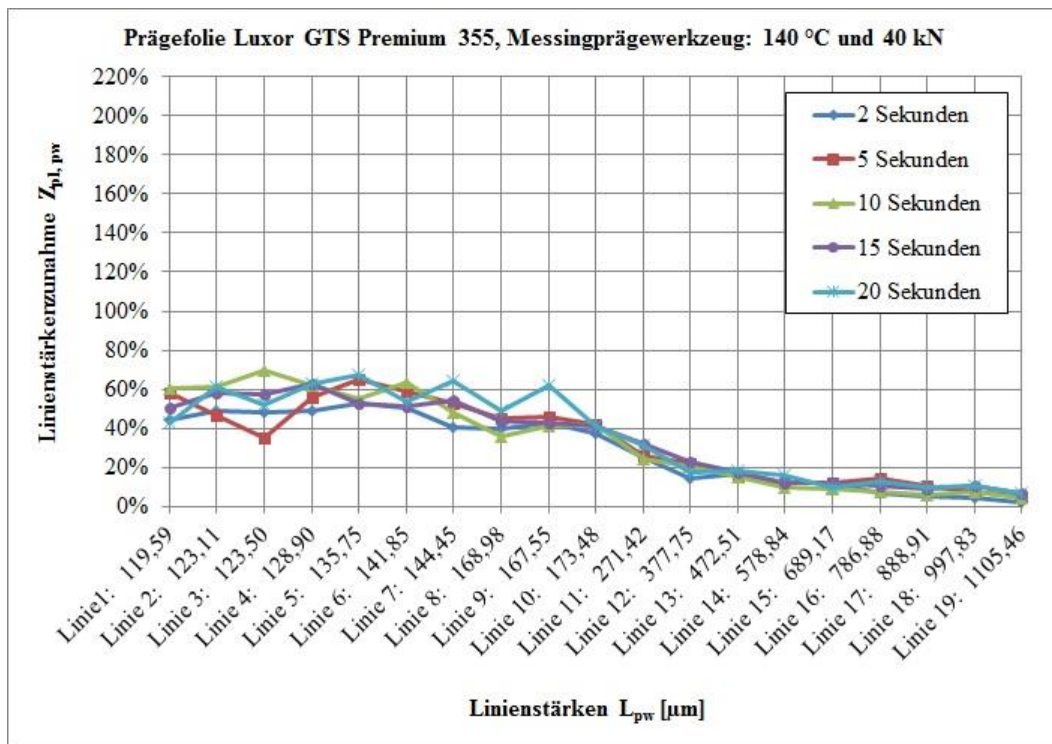


Abb. 6.29: Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ (nach Gleichung 6.1 auf Seite 102) der geprägten Linien der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** in Bezug auf die gravierten Linien des **Messingprägewerkzeuges**. Soll-Temperatur: 140 °C; Prägezeit: 2 s, 5 s, 10 s, 15 s, 20 s; Anpressdruck: 40 kN.

Für das Messingprägewerkzeug liegen die Werte $Z_{pl,pw}$ unter 70 %. Eine eindeutige Tendenz für die Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ bei unterschiedlichen Prägezeiten ist nicht zu sehen. Die Werte $Z_{pl,pw}$ für die Linien 1-10 schwanken stark und erst ab der Linie 11 zeigen sie geringere Schwankungen.

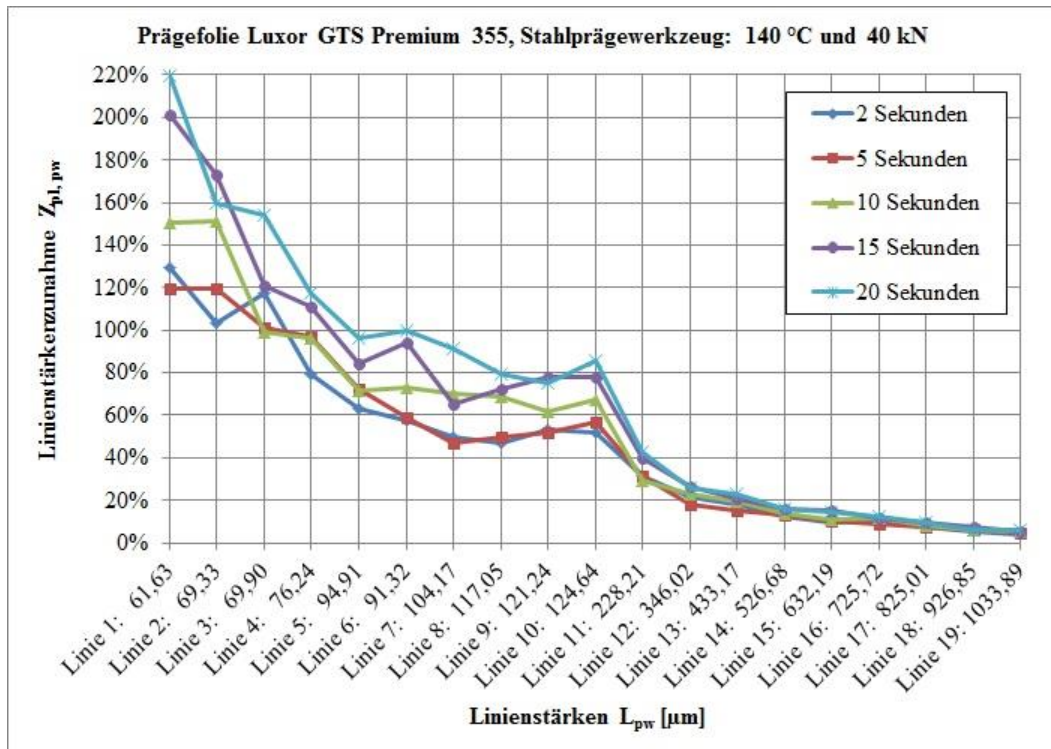


Abb. 6.30: Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ (nach Gleichung 6.1 auf Seite 102) der geprägten Linien der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** in Bezug auf die gravierten Linien des **Stahlprägewerkzeuges**. Soll-Temperatur: 140 °C; Prägezeit: 2 s, 5 s, 10 s, 15 s, 20 s; Anpressdruck: 40 kN.

Für das Stahlprägewerkzeug liegt die Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ bei den geprägten Linien bei max. 220 %. Die Schwankung in den Werten bei den Linien 1-10 ist ebenfalls hoch, so dass die Ergebnisse aufgrund der hohen Prozessunsicherheit nicht aussagekräftig beurteilt werden können. Ab der Linie 11 liegen die Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ unter 40 % und sinken mit der steigenden Linienstärke L_{pw} unabhängig von der Prägezeit synchron zu einander.

6.5.3.2 Prägefolie HS 19-3

Die Ergebnisse für die Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ der geprägten Linien der Prägefolie HS 19-3 sind in Abb. 6.31 und Abb. 6.32 zu sehen.

Die Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ bei den geprägten Linien der Prägefolie HS 19-3 mit dem Messingprägewerkzeug (Abb. 6.31) beträgt max. 82,5 %. Bei den Linien 11-19 liegt sie größtenteils unter 40 % und tendiert mit einer Erhöhung der Linienstärken L_{pw} gegen 0 %.

Eine eindeutige Prägezeit, bei der die Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ den kleinsten Wert annimmt, kann sowohl beim Messingprägewerkzeug als auch beim Stahlprägewerkzeug nicht ermittelt werden. Für das Stahlprägewerkzeug überschreiten die Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ den Wert von 190 %. Ab der Linie 11 liegen sie unter 40 % (Abb. 6.32).

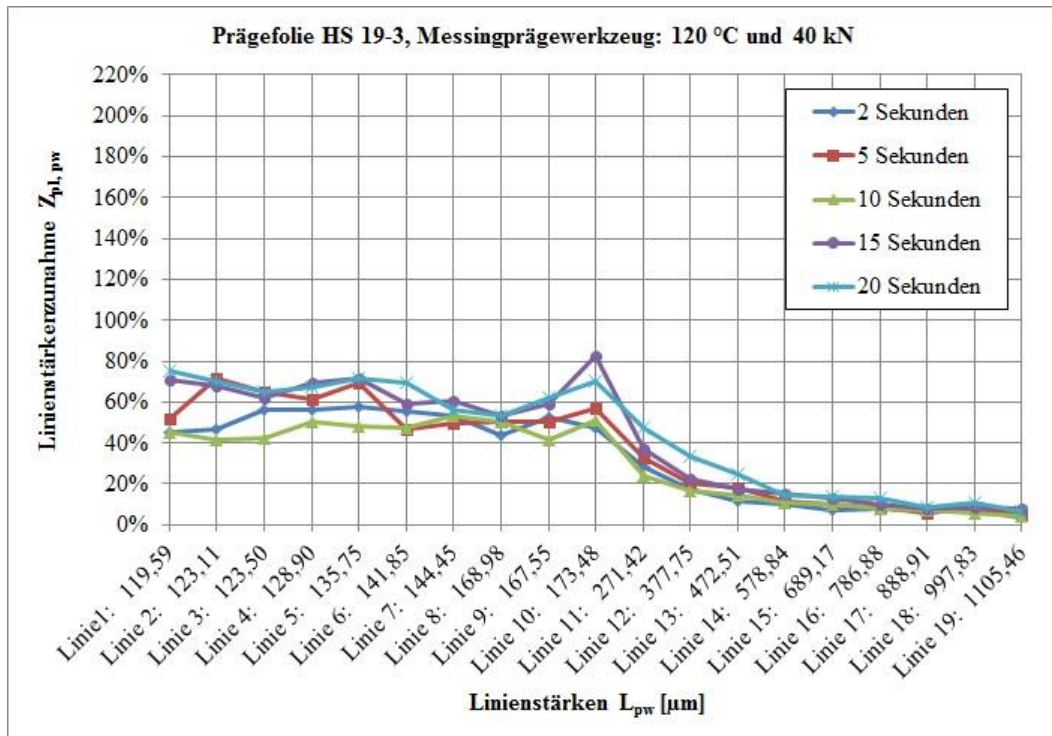


Abb. 6.31: Linienstärkenzunahmen $Z_{pt,pw}$ (nach Gleichung 6.1 auf Seite 102) der geprägten Linien der Prägefolie **HS 19-3** in Bezug auf die gravierten Linien des **Messingprägewerkzeuges**. Soll-Temperatur: 120 °C; Prägezeit: 2 s, 5 s, 10 s, 15 s, 20 s; Anpressdruck: 40 kN.

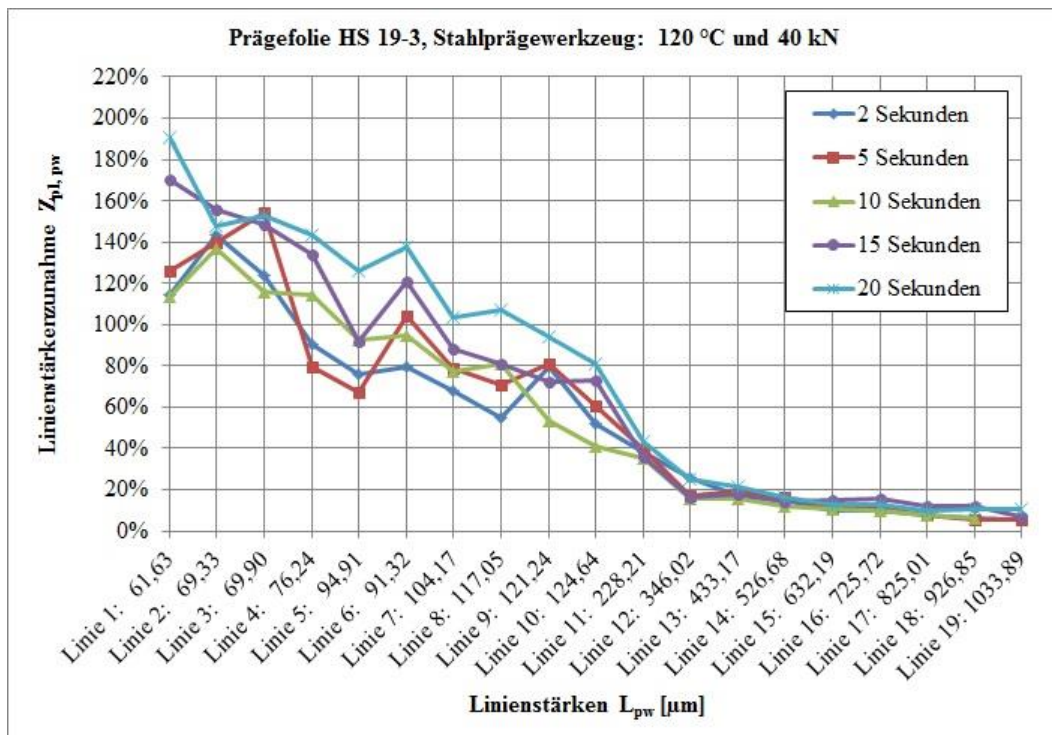


Abb. 6.32: Linienstärkenzunahmen $Z_{pt,pw}$ (nach Gleichung 6.1 auf Seite 102) der geprägten Linien der Prägefolie **HS 19-3** in Bezug auf die gravierten Linien des **Stahlprägewerkzeuges**. Soll-Temperatur: 120 °C; Prägezeit: 2 s, 5 s, 10 s, 15 s, 20 s; Anpressdruck: 40 kN.

6.5.3.3 Zusammenfassung

Im Wesentlichen unterschieden sich die geprägten Linienstärken L_{pl} bei der Variierung der Prägezeiten an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 nicht, solange sie mit demselben Prägewerkzeug geprägt werden. Sobald das Prägewerkzeug gewechselt wird, erhöhen sich die Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ beim Stahlprägewerkzeug auf bis zu 220 %. Dabei liegen die gleichen Werte $Z_{pl,pw}$ beim Messingprägewerkzeug bei max. 82,5 %. Beim Prägefolienwechsel ist keine Tendenz zur Änderung der Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ zu beobachten.

Die Schwankungen der Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ für die Linien 1-10 sind unabhängig von Prägewerkzeugen, Prägefolie und Prägezeit. Sie sind auf rauen Kanten der geprägten Linien im Prägefoliendruckprozess zurückzuführen. Ab der Linie 11 sinken die Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ unter 40 % und liegen eng beisammen ohne sichtbare Tendenz zur Senkung oder Steigerung bei einer bestimmten Prägezeit.

6.5.4 Variierung des Anpressdrucks

6.5.4.1 Prägefolie Luxor GTS Premium 355

Die Ergebnisse der Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ der geprägten Linien der Prägefolie Luxor GTS Premium 355 bei der konstanten Soll-Temperatur von 140 °C, Prägezeit 15 Sekunden und verschiedenen Werten des Anpressdrucks sind in Abb. 6.33 und Abb. 6.34 dargestellt. In Abb. 6.33 sind die Ergebnisse mit dem Messingprägewerkzeug, in Abb. 6.34 mit dem Stahlprägewerkzeug gezeigt.

Beim Einsatz des Messingprägewerkzeuges liegen die Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ beim Variieren des Anpressdrucks von 30 kN bis 40 kN mit 5-kN-Schritten unter 80 % und verlaufen relativ synchron zu einander, so dass eine Senkung oder Steigerung der geprägten Linienstärken L_{pl} bei einem bestimmten Anpressdruckwert nicht sichtbar ist. Ab der Linie 11 liegen die Werte $Z_{pl,pw}$ unter 40 %.

Die geprägten Linienstärken L_{pl} haben eine Abweichung von bis zu 140 % zu den Linienstärken L_{pw} auf dem Stahlprägewerkzeug (Abb. 6.34). Ab der Linie 11 liegen die Werte $Z_{pl,pw}$ unter 40 % und sinken mit Erhöhung der Linienstärken L_{pw} .

Ein wesentlicher Unterschied in den geprägten Linienstärken L_{pl} beim Variieren des Anpressdrucks kann hier ebenfalls nicht festgestellt werden.

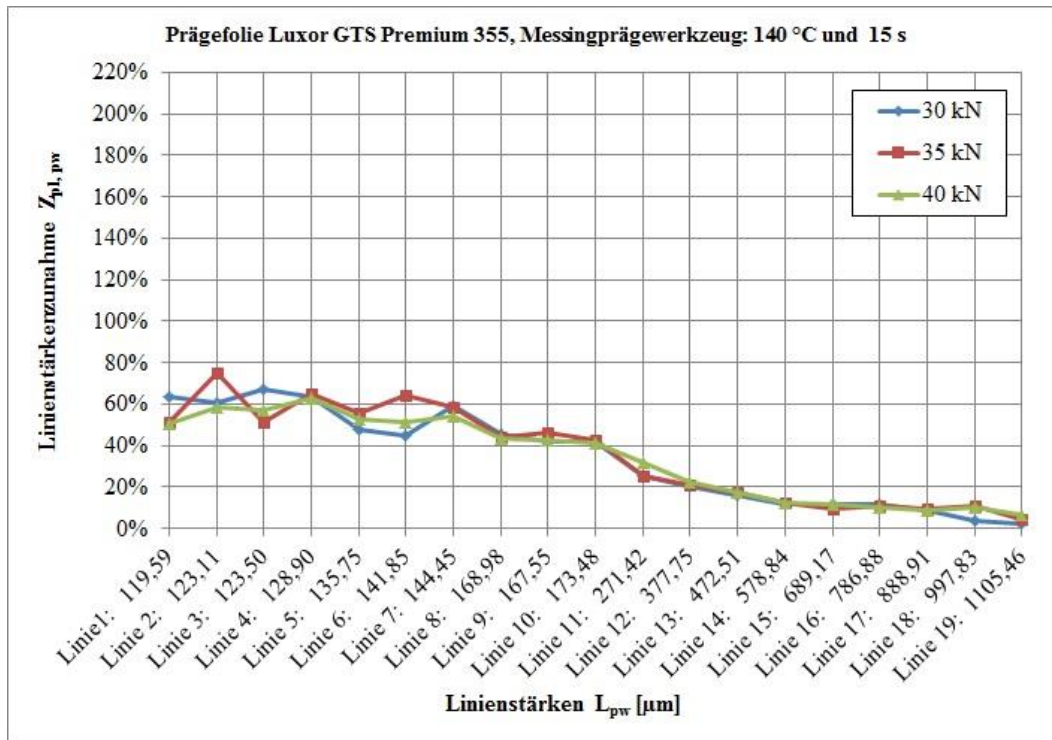


Abb. 6.33: Liniestärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ (nach Gleichung 6.1 auf Seite 102) der geprägten Linien der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** in Bezug auf die gravierten Linien des **Messingprägewerkzeuges**. Soll-Temperatur: 140 °C; Prägezeit: 15 s; Anpressdruck: 30 kN, 35 kN; 40 kN.

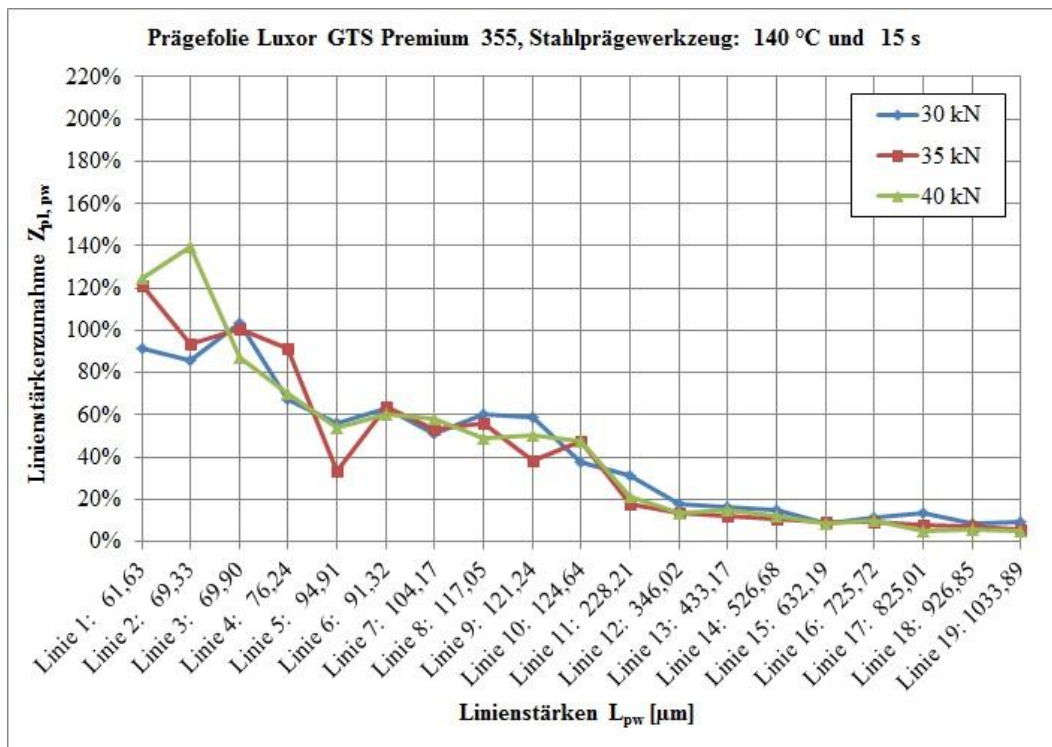


Abb. 6.34: Liniestärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ (nach Gleichung 6.1 auf Seite 102) der geprägten Linien der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** in Bezug auf die gravierten Linien des **Stahlprägewerkzeuges**. Soll-Temperatur: 140 °C; Prägezeit: 15 s; Anpressdruck: 30 kN, 35 kN; 40 kN.

6.5.4.2 Prägefolie HS 19-3

Die Ergebnisse sind für die Variierung des Anpressdruckwerts von 30 kN bis 40 kN mit 5-kN-Schritten für die Prägefolie HS 19-3 in Abb. 6.35 und Abb. 6.36 zu sehen.

Beim Prägefoliendruck mit dem Messingprägewerkzeug steigen die Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ der geprägten Linien bis zu 83 % (Abb. 6.35). Ab der Linie 11 sinken die Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ unter 40 % und nähern sich 5 %.

Die in Abb. 6.36 dargestellten Ergebnisse zeigen die Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ für die geprägten Linien mit dem Stahlprägewerkzeug, welche fast bis auf 190 % steigen und mit der Erhöhung der Linienstärken L_{pw} sinken. Ab der Linie 11 sind die Werte $Z_{pl,pw}$ bei 40 % und weisen den niedrigsten Wert $Z_{pl,pw}$ von 5 % bei der Linie 19 auf.

Die Verläufe für die beiden Prägewerkzeuge zeigen eine erhöhte Prozessunsicherheit des Prägefoliendrucks für die geprägten Linien 1-10. Ab der Linie 11 verlaufen die Werte $Z_{pl,pw}$ relativ synchron, wodurch keine Tendenz für die Steigerung der Linienstärken L_{pl} bei Senkung oder Steigerung des Anpressdrucks an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 erkennbar ist.

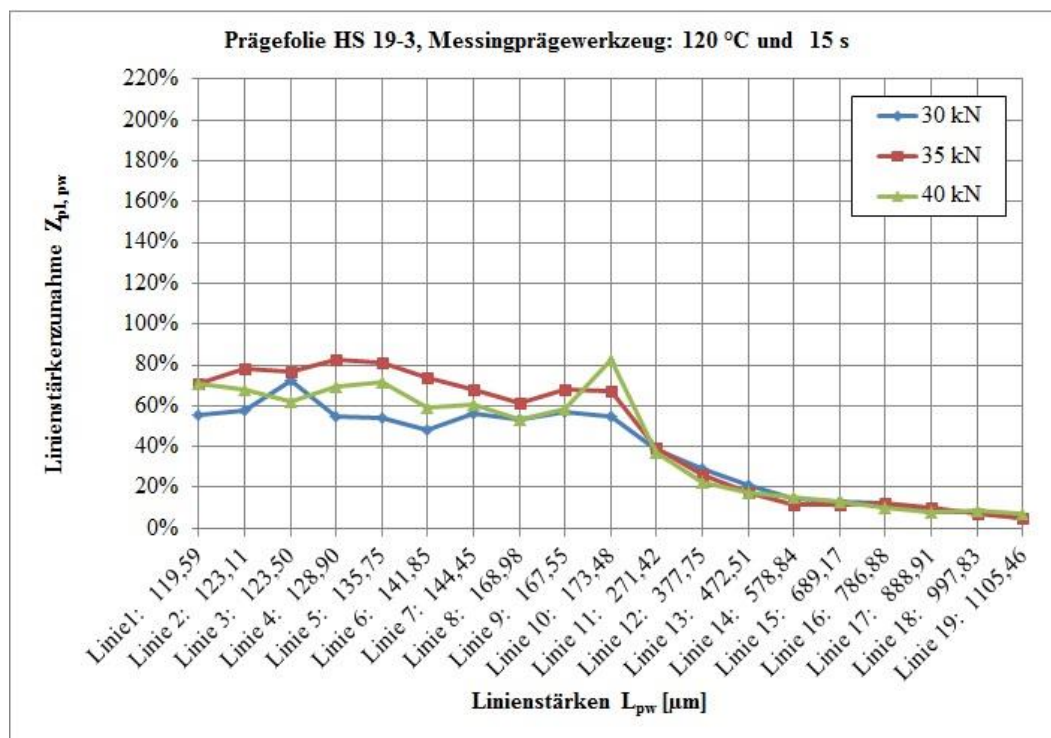


Abb. 6.35: Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ (nach Gleichung 6.1 auf Seite 102) der geprägten Linien der Prägefolie **HS 19-3** in Bezug auf die gravierten Linien des **Messingprägewerkzeuges**. Soll-Temperatur: 120 °C; Prägezeit: 15 s; Anpressdruck: 30 kN, 35 kN; 40 kN.

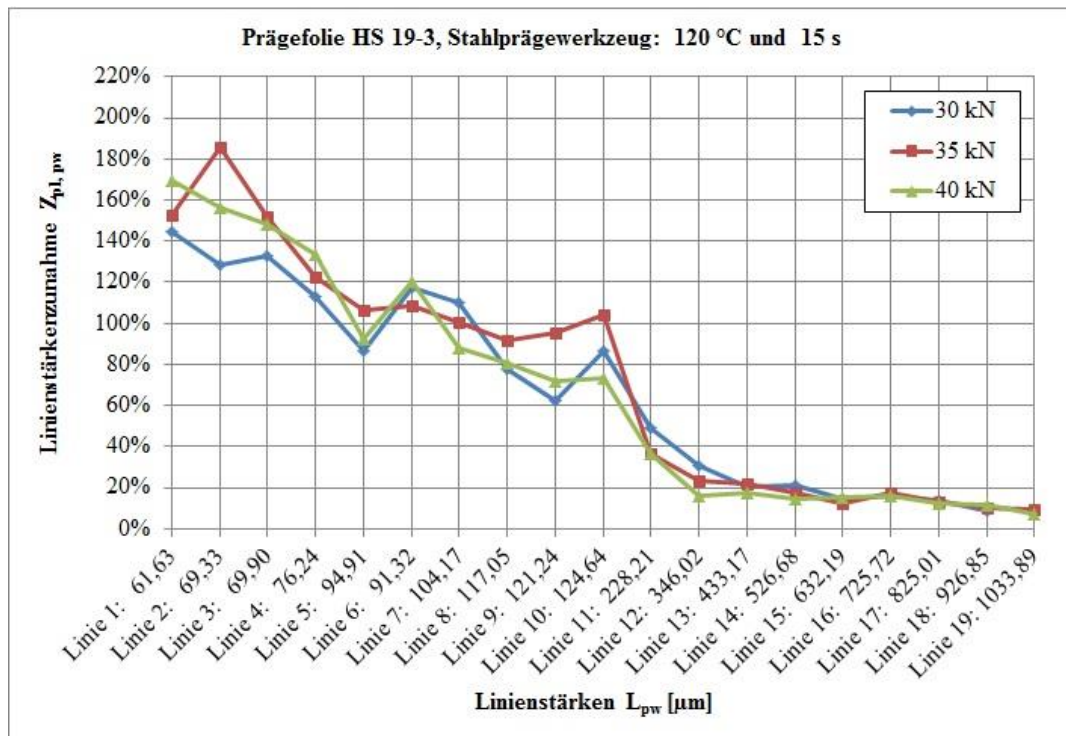


Abb. 6.36: Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ (nach Gleichung 6.1 auf Seite 102) der geprägten Linien der Prägefolie **HS 19-3** in Bezug auf die gravierten Linien des **Stahlprägewerkzeuges**. Soll-Temperatur: 120 °C; Prägezeit: 15 s; Anpressdruck: 30 kN, 35 kN; 40 kN.

6.5.4.3 Zusammenfassung

Aus den vorgestellten Ergebnissen folgt, dass die geprägten Linienstärken L_{pl} im Wesentlichen nicht vom Anpressdruck abhängig sind. Diese liegen für die geprägten Linien 11-19 nahe beieinander und zeigen keine eindeutige Tendenz für einen bestimmten Anpressdruckwert, bei dem die Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ minimal ist.

Mit Hilfe der Ergebnisse für die geprägten Linien 1-10 kann keine Aussage getroffen werden, da in diesem Bereich die Linien durch die Prozessunsicherheit bis zu 189,5 % im Vergleich mit den Linienstärken L_{pw} auf dem Stahlprägewerkzeug und bis zu 82,5 % im Vergleich mit den Linienstärken L_{pw} auf dem Messingprägewerkzeug breiter geprägt werden.

Ein wesentlicher Unterschied in den Werten $Z_{pl,pw}$ für die Linien 1-10 ist für verschiedene Prägewerkzeuge zu beobachten, wobei dieser ab der Linie 11 nicht mehr feststellbar ist. Die Abhängigkeit der Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ von der Prägefolie ist nicht zu sehen.

6.5.5 Zusammenfassung

In Zusammenfassung aller Ergebnisse des Abschnitts 6.5 sind folgende Erkenntnisse festzustellen: Die geprägten Linienstärken L_{pl} nehmen während des Prägefoliendrucks zu. Diese Zunahme sinkt mit der Steigerung der Linienstärke L_{pw} ab. Eine eindeutige Tendenz für die Linienstärken L_{pl} bei unterschiedlichen Prozessparametern und derer Variierung ist

nicht feststellbar. Der Prägefolienwechsel hat ebenfalls keinen sichtbaren Einfluss auf die Prägeergebnisse. Ein wesentlicher Unterschied bei den geprägten Linien 1-10 bringt der Prägewerkzeugwechsel mit sich. Dabei sinkt die Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ beim Übergehen zum Messingprägewerkzeug wesentlich ab, obwohl dies für die Linien 11-19 nicht eindeutig festzustellen ist.

Generell haben die geprägten Linien 1-10 eine hohe Kantenrauheit, so dass die Bestimmung der Linienstärken L_{pl} erschwert ist und zu fehlerhaften Aussagen führen kann. Den Ergebnissen in Abb. 6.20 (siehe Seite 104) zur Folge liegt die mittlere Mess- und Prozessunsicherheit für die Linien 1-10 über 140 % und sinkt für die Linien 11-19 unter 10 %.

6.6 Restliches Prozessmaterial

Bei den restlichen Prozessmaterialien, wie Prägewerkzeug und Prägeunterlage, können als Ausgangsgrößen ihre Zustandsänderung und die damit verbundene Lebensdauer (siehe Tabelle 3.2 auf Seite 36) betrachtet werden. Diese haben ebenfalls einen Einfluss auf die Prägeergebnisse und vor allem ihre Wiederholbarkeit über einen längeren Zeitraum in der Produktion.

6.6.1 Prägewerkzeuge

Die Prägewerkzeuge werden nach einigen Prägefoliendruckvorgängen mittels des Profilometers Sensofar Plμ Neox erneut untersucht, um die Zustandsänderung nach den durchgeführten Experimenten festzustellen.

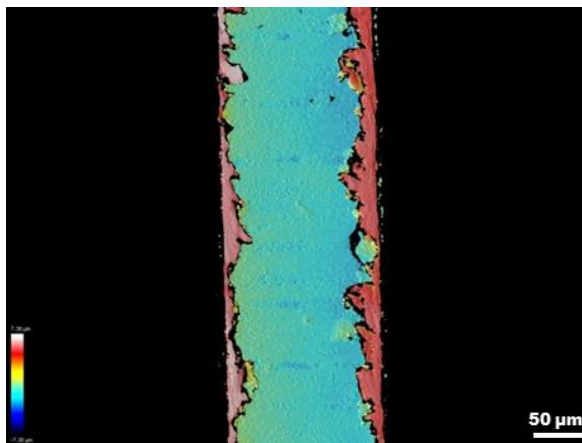


Abb. 6.37: Sensofar-Aufnahme (konfokal) der Linie 10 des **Messingprägewerkzeuges** mit 50-facher Vergrößerung. Der unterste Bereich auf der Skala (linke Ecke): dunkel blau hat den Wert -7,30 µm, der oberste Bereich in weiß 7,38 µm.

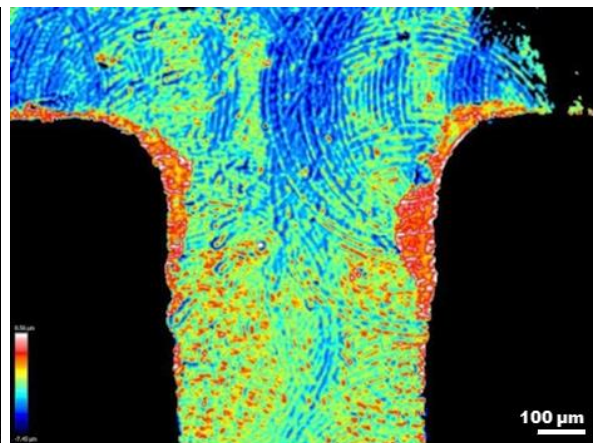


Abb. 6.38: Sensofar-Aufnahme (konfokal) der Linie 14 des **Stahlprägewerkzeuges** mit 10-facher Vergrößerung: Maßstab ist 100 µm. Der unterste Bereich auf der Skala (linke Ecke): dunkel blau hat den Wert -7,45 µm, der oberste Bereich in weiß 8,56 µm.

In Abb. 6.37 und Abb. 6.38 sind Beispielaufnahmen der Prägwerkzeuge nach einigen Prägefoliendruckvorgängen dargestellt. Am Rand sind um einige μm erhöhte Stellen (mit rot gekennzeichnet) zu sehen, die bei den neuen Prägwerkzeugen (vergleiche Abb. 4.7 und Abb. 4.8 auf Seite 45) nicht zu beobachten sind. Es sind die Reste der Prägefolien, die während des Prägefoliendrucks auf den Prägwerkzeugoberflächen zurückgeblieben sind.

Diese Reste der Prägefolien können durch die Reinigung der Prägwerkzeuge entfernt werden. Deren Bildung in Abhängigkeit vom Prägefolientyp oder den Prozessparametern wird im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht.

Weitere Abnutzung der Prägwerkzeuge und eine Änderung z. B. der Linienstärken L_{pw} und Kanten der gravierten Prägestrukturen konnte während dieser Arbeit nicht festgestellt werden. Daher kann eine Aussage über die Lebensdauer der Prägwerkzeuge nicht getroffen werden. Dies liegt an der niedrigen Anzahl der Prägegüter von 64 (weit unter 1 % möglicher Auflagenhöhe in der grafischen Industrie), die im Rahmen der Arbeit entstanden sind. Bei einer realen Produktion sind die Auflagen viel höher und es ist möglich, dass die dabei entstehende Abnutzung des Prägwerkzeugwerkstoffs deutlicher zu beobachten ist.

6.6.2 Prägeunterlage

Die Prägeunterlage wird, wie die Prägwerkzeuge, nach einigen Prägefoliendruckvorgängen mittels des Profilmeters Sensofar Plu Neox untersucht, um ihre Zustandsänderung im Vergleich zu dem in Abschnitt 4.5 untersuchten Zustand festzustellen. Dabei wird insbesondere die Oberflächenbeschaffenheit genauer betrachtet.

Bereits nach wenigen Prägefoliendruckvorgängen ist, trotz der Härte der Stahlprägeunterlage, eine plastische Verformung der Prägeunterlage an den Kontaktstellen mit den Prägwerkzeugen, die mit einer Sensofar-Aufnahme in Abb. 6.39 erkennbar ist, zu beobachten (vergleiche Abb. 4.25 auf Seite 58). Dies ist auch der Grund für die Deformationen der Prägegüter an den Kontaktstellen mit den Prägwerkzeugen (siehe Abb. 6.10 auf Seite 97). Diese Vertiefungen sind bei allen gravierten Linien unabhängig von ihrer Linienstärke L_{pw} zu sehen.

Ein senkrechtes Profil der aufgenommenen Stelle der Prägeunterlage in Abb. 6.39 ist in Abb. 6.40 sehen. Die Prägeunterlage wird durch den Prägefoliendruck um ca. 6 μm in Tiefenrichtung verformt.

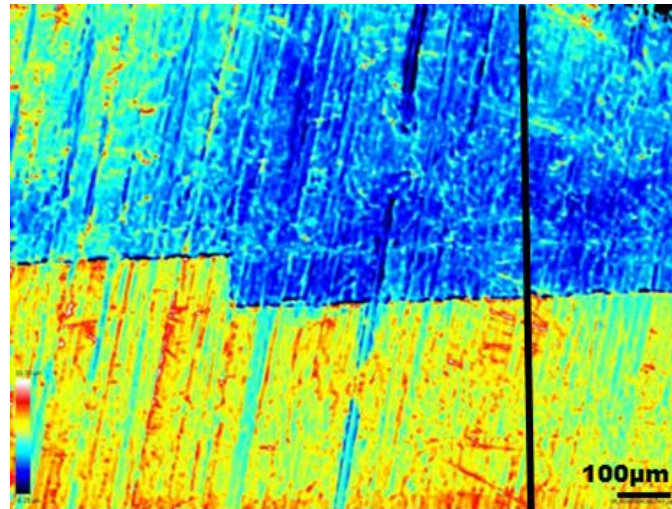


Abb. 6.39: Sensofar-Aufnahme (konfokal) der Prägeunterlage mit 10-facher Vergrößerung. Der unterste Bereich auf der Skala (linke Ecke): dunkel blau hat den Wert $-8,25 \mu\text{m}$, der oberste Bereich in weiß $10,38 \mu\text{m}$.

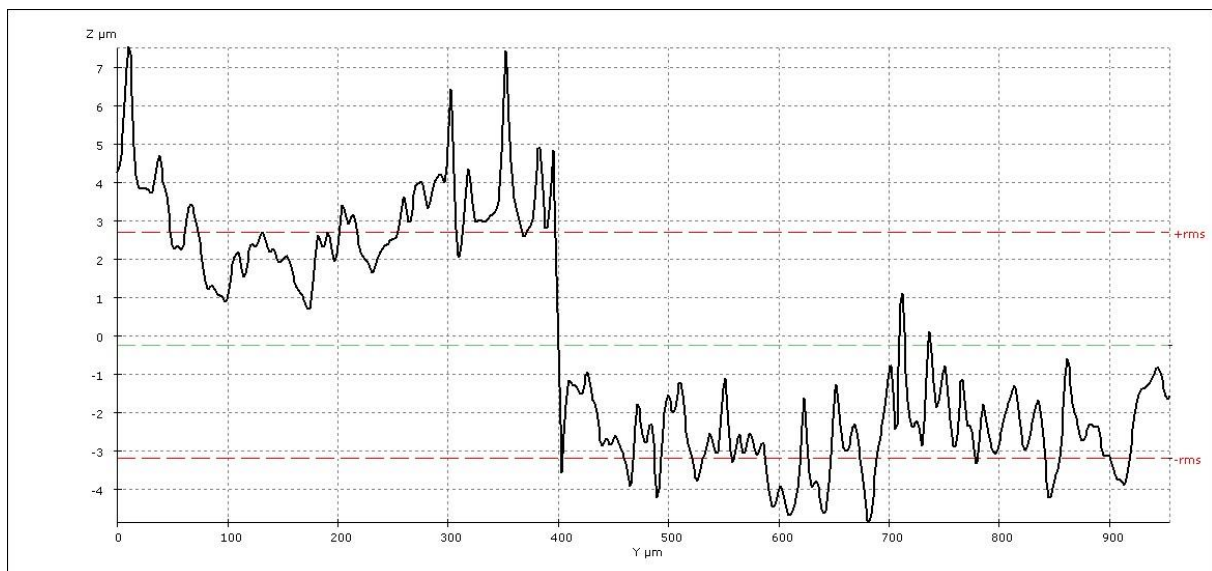


Abb. 6.40: Profil einer Messstelle der Prägeunterlage, welche mit der in Abb. 6.39 schwarzen Linie gezeichnet ist.

Mit steigender Anzahl an Prägefoliendruckvorgängen ist die Deformation der Prägeunterlageoberfläche deutlicher zu erkennen. Außerdem ist bei großen Auflagen mit einer weiteren Verformung der Prägeunterlage bzw. einer größeren Verformung des Substrats während des Prägefoliendruckvorgangs zu rechnen.

Eine Veränderung der Oberflächenrauheit R_a der Prägeunterlage nach einigen Prägefoliendruckvorgängen ist nicht sichtbar. Allerdings ist festzustellen, dass sie keinen erkennbaren Einfluss auf die Oberflächenrauheit R_a der geprägten Strukturen hat (vergleiche Profile in Abb. 6.12 und Abb. 6.13 auf Seite 99 mit Abb. 6.40). Dies wird durch die Schichtdicke des Substrats, die im Vergleich mit der Oberflächenrauheit R_a der Prägeunterlage höher ist, kompensiert.

6.7 Schlussfolgerungen

Mit den gewonnen Erkenntnissen über die untersuchten Eingangs- und Ausgangsparameter des in der Arbeit untersuchten Prägefoliendrucksystems (Abb. 3.3 auf Seite 29) wird deren quantitativer und qualitativer Zusammenhang deutlich. Quantitativ kann der Einfluss der einzelnen untersuchten Eingangsparameter, sowohl der Prozessmaterialien als auch der Prozessparameter, aus den gemessenen geprägten Linienstärken L_{pl} berechnet werden. Qualitativ wird die Einschätzung der Korrelation basierend auf den einzelnen Untersuchungen der Eingangsparameter durchgeführt.

6.7.1 Quantitativer Zusammenhang der Eingangs- und Ausgangsparameter

Die Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ beschreibt als Ausgangsparameter quantitativ die Änderung des Prägefoliendrucksystems aufgrund des Variierens einer der Eingangsgrößen.

Insgesamt wurde der Einfluss der fünf Eingangsgrößen auf die Linienstärken L_{pl} der geprägten Strukturen untersucht. Diese sind: Prägewerkzeug, Prägefolie, Prägetemperatur (im Verlauf der Arbeit Soll-Temperatur an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6), Prägezeit und Anpressdruck.

Ihr Einfluss auf die Prägeergebnisse wird mittels einer einfachen Methode nachvollzogen. Dabei wird ein Mittelwert für die Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ für jedes von 64 Prägegütern berechnet. Aufgrund großer Prozessunsicherheit des Prägefoliendrucks bei den geprägten Linien 1-10 (siehe Abb. 6.20 auf Seite 104) werden nur die Linienstärkenzunahmewerte $Z_{pl,pw}$ ab der Linie 11 zur Auswertung einbezogen.

Im nächsten Schritt werden die absoluten Unterschiede der vorausberechneten Mittelwerte der Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ beim Variieren der Prozessmaterialien und Prozessparameter (dabei wird nur ein Eingangsparameter variiert, die restlichen werden konstant gehalten) ermittelt. Damit kann der quantitative Einfluss der jeweiligen Eingangsparameter auf die Linienstärken L_{pl} in Bezug auf die gravierten Linienstärken L_{pw} auf den Prägewerkzeugen geschätzt werden.

Der Mittel- und Maximalwert sowie die Standardabweichung aller Unterschiede in der Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ über alle 64 im Rahmen der Arbeit gefertigten Prägegüter sind in Tabelle 6.3 zu sehen.

Aus der Tabelle 6.3 ist zu folgern, dass der Wechsel der Prägewerkzeuge den größten Einfluss auf die Linienstärken L_{pw} der geprägten Strukturen hat. Dabei ist mit einer Veränderung der Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ bis zu 9,86 % zu rechnen. Im untersuchten Fall wurden bei den mit dem Messingprägewerkzeug geprägten Linien kleinere Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ als bei den gleichen mit dem Stahlprägewerkzeug berechnet.

Tabelle 6.3: Mittel-, Maximalwerte und Standardabweichung der Veränderung der Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ bei den geprägten Linien beim Variieren der jeweiligen Eingangsparameter.

<i>Eingangsparameter</i>	<i>Mittelwert der Veränderung der Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$</i>	<i>Maximalwert der Veränderung der Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$</i>	<i>Standardabweichung der Veränderung der Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$</i>
Prägewerkzeug	2,89 %	9,86 %	1,83 %
Prägefolie	2,51 %	5,78 %	1,74 %
Soll-Temperatur (10 °C-Schritt)	2,02 %	6,42 %	1,49 %
Prägezeit (5 s-Schritt)	1,99 %	6,22 %	1,37 %
Anpressdruck (5 kN-Schritt)	1,72 %	4,29 %	1,58 %

Zweiter entscheidender Eingangsparameter ist die Prägefolie selbst. Beim Wechsel zwischen den beiden untersuchten Prägefolien kann eine Veränderung der Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ bis zu 5,78 % festgestellt werden. Tendenziell hat die Prägefolie Luxor GTS Premium 355 mit dem Messingprägewerkzeug kleinere Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ zur Folge. Die Prägefolie HS 19-3 erreicht mit dem Stahlprägewerkzeug einen kleinen Zuwachs.

Ein weiterer Eingangsparameter, der einen Einfluss auf die Prägeergebnisse hat, ist die voreingestellte Soll-Temperatur. Ihre Veränderung um 10 °C bringt eine Veränderung (Anstieg oder Senkung) der Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$ um bis zu 6,42 % mit sich, wobei dieser Einfluss bei den geprägten Linien mit der Veränderung der Prägezeit um 5 Sekunden zu vergleichen ist. Diese liegt bei 6,22 %.

Beim Variieren des Anpressdrucks um 5 kN kann ein Einfluss auf die Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ bis zu 4,29 % berechnet werden, welcher der kleinste Einfluss der untersuchten Eingangsgrößen ist und damit den geringsten Effekt auf die Prägeergebnisse hat.

Im Allgemeinen ist eine Tendenz zur Senkung der Einflüsse von Eingangsparametern mit der Erhöhung der Linienstärken L_{pw} festzustellen.

6.7.2 Kennlinie zur Kompensation der Linienstärkenzunahme im Prägefoliendruck

Aufgrund der durchgeführten und in Abschnitt 6.5 beschriebenen Messungen als auch der quantitativen Auswertung in Abschnitt 6.7.1 kann eine Kennlinie zur Kompensation der Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,Layout}$ im Prägefoliendruck angegeben werden. Da der Einfluss der einzelnen Eingangsparameter auf die geprägten Linienstärken L_{pl} unter 10 % liegt, kann ein Mittelwert für die Linienstärkenzunahme $\bar{Z}_{pl,Layout}$ über die Messwerte aller 64 Prägegüter mit einer minimalen Ungenauigkeit gebildet werden. In Folge der hohen

Kantenrauheit der Linien 1-10 und entsprechend dem hohen Fehler (siehe Abb. 6.20 auf Seite 104) werden diese in Abb. 6.41 nicht dargestellt.

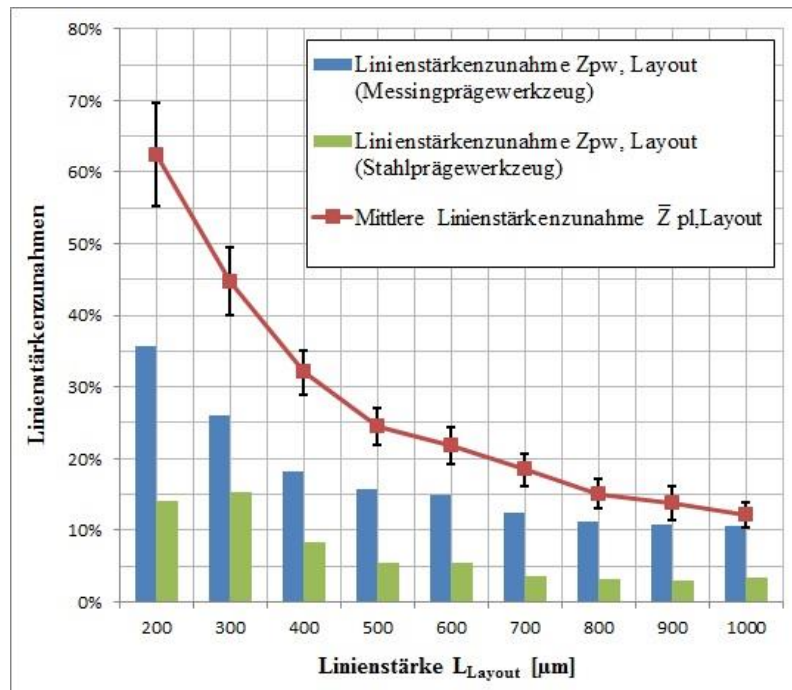


Abb. 6.41: Kennlinie zur Kompensation der Linienstärkezunahme $\bar{Z}_{pl, Layout}$ (nach Gleichung 6.2 auf Seite 102) im Prägefoliendruck der Linien mit im Layout vorgegebenen Linienstärke L_{Layout} zwischen 200 µm und 1000 µm. Die Werte $Z_{pw, Layout}$ (nach Gleichung 4.1 auf Seite 48) stellen die Linienstärkezunahme während des Gravierprozesses der Messing- und Stahlprägewerkzeuge dar.

Der mittlere Wert der Linienstärkezunahme $\bar{Z}_{pl, Layout}$ bei der Linienstärke L_{Layout} von 200 µm liegt bei 61 % und sinkt mit der steigenden Linienstärke L_{Layout} bis zu 11 %. Bei der Kompensation der Linienstärkezunahme $Z_{pl, Layout}$ ist außerdem die Linienstärkezunahme $Z_{pw, Layout}$, die während des Gravierprozesses der Prägewerkzeuge entsteht, zu berücksichtigen. Entsprechend der Ergebnisse der Linienstärkezunahme $Z_{pw, Layout}$ (siehe Abschnitt 4.2), ist sie bei dem Messingprägewerkzeug höher.

Die Ergebnisse über den Zusammenhang der Eingangs- und Ausgangsparameter im untersuchten Prägefoliendrucksystem (siehe Abschnitt 6.7.1) sowie die Kennlinie in Abb. 6.41 sind von der Autorin auf der WCPC Annual Technical Conference 2013 [LYA12c] vorgetragen worden.

6.7.3 Qualitativer Zusammenhang der Eingangs- und Ausgangsparameter

Der Einfluss der Eingangsparameter auf die weiteren dimensional Eigenschaften der 64 Prägegüter (siehe Tabelle 6.1 auf Seite 92) kann nur relativ bestimmt werden, da die weiteren Ausgangsparameter nicht quantitativ untersucht wurden. Durch die Zustandsänderung der Prägewerkzeuge und der Prägeunterlage beim Prägefoliendruck können weitere Qualitätsmängel der Prägeergebnisse verursacht werden.

Die Konturenform der geprägten Strukturen wird vor allem durch die Qualität der Bearbeitung der gravierten Prägestrukturen der Prägewerkzeuge beeinflusst. Dadurch wird auch die Homogenität und die Oberflächenrauheit R_a der geprägten Schichten beeinflusst und bei falsch ausgewählten Prozessparametern verschlechtert. Obwohl eine Korrelation zwischen Oberflächenrauheit R_a des Prägegutes und Oberflächenrauheit R_a des Substrats zu erwarten war, konnte sie aufgrund der Deformation des Substrats (siehe Abb. 6.10 auf Seite 97) nicht festgestellt werden.

Da die untersuchten Prägefolien bei der Untersuchung relativ homogene Klebe- und Metallschichten aufweisen, liegen weitere Mängel der Qualität der Prägegüter an den Prozessparametern. Zu vermuten ist, dass die Kantenrauheit der geprägten Linien sowohl durch die untersuchten Eingangsparameter als auch durch die nicht untersuchten Prozessparameter, wie Abziehwinkel φ_{ab} , -kraft F_{ab} und -zeit, beeinflusst wird. Dadurch, dass diese Prozessparameter konstant gehalten wurden, kann davon ausgegangen werden, dass auch deren Einfluss auf die Prägeergebnisse konstant war und die Auswertung der untersuchten Prozessparameter nicht beeinflusste.

Außer des festgestellten Zusammenhangs der Eingangs- und Ausgangsparameter in Abschnitt 6.7.1 haben die untersuchten Prozessparameter (Prägetemperatur, Prägezeit und Anpressdruck) einen Einfluss auf die Homogenität der Prägegüter und die Gleichmäßigkeit des Übertragens der Transferschichten der Prägefolie auf das Substrat. Bei niedrig gewähltem Anpressdruck wird die inhomogene Anpressdruckverteilung (siehe Abschnitt 5.3) bei den Prägeergebnissen sichtbar. Der gleiche Effekt ist bei nicht ausreichender (und inhomogen verteilter) Prägetemperatur (siehe Abschnitt 5.2) und Prägezeit zu sehen.

Das Substrat, die Prägeunterlage sowie der Anpressdruck sind maßgeblich für die Tiefe der Einprägung der geprägten Strukturen in das Substrat.

6.8 Zusammenfassung

In Kapitel 6 wurden die Ausgangsparameter zur Untersuchung des in Kapitel 3 definierten Prägefoliendrucksystems festgelegt. Nach einer Reihe von Experimenten an der GEBA 6 wurden die entstandenen Prägegüter genauer untersucht. Hauptsächlich fand eine Untersuchung der dimensional Eigenschaften der Prägegüter statt, da die elektrische Leitfähigkeit der geprägten Strukturen durch die Vorversuche für die Prägefolien (siehe Abschnitt 4.3.1) vorausgesetzt ist.

Die Ergebnisse der Untersuchung der 64 Prägegüter wurden im weiteren Verlauf dieses Kapitels qualitativ und quantitativ beurteilt. Zur quantitativen Auswertung wurden die Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,Layout}$ und $Z_{pl,pw}$ berechnet, die nur eine minimale Korrelation zwischen Eingangsparametern, wie Prägefolie, Prägewerkzeuge, Prägetemperatur, Prägezeit und Anpressdruck, und Ausgangsparametern zeigten. Zur qualitativen Beurteilung wurden die weiteren Ausgangsparameter für die dimensional Eigenschaften der Prägegüter einbezogen, die einen Zusammenhang zwischen der Qualität der Bearbeitung der Prägewerkzeuge, ihrer Oberflächenhomogenität und -rauheit und dem Prägefoliendruckergebnis nachgewiesen

haben. Außerdem wurde das bestehende Wissen über einen direkten Einfluss der Prozessparameter auf die Qualität der Prägegüter bestätigt.

Neben den während der Experimente entstandenen Prägegütern wurden die Prägewerkzeuge und die Prägeunterlage nach mehreren Prägefoliendruckvorgängen untersucht, um deren Zustandsänderung in Bezug auf den Neuzustand festzustellen. Dabei wurden einige Mängel im Zustand dieser Prozessmaterialien beobachtet.

Eine weitere wichtige Erkenntnis des Kapitels 6 liefert die erstmalig erstellte Kennlinie zur Kompensation der Linienstärkenzunahme im Prägefoliendruck. Diese Kennlinie wurde aufgrund der durchgeführten Experimenten und Messungen im Rahmen dieser Arbeit ermittelt und kann zur Erreichung der gewünschten Linienstärken beim Prägefoliendruck auch in der Praxis benutzt werden.

In Kapitel 7 werden weitere Empfehlungen für die Praxisanwendung des Prägefoliendrucks im Elektronikbereich zusammengefasst und zwei Beispiele möglicher Anwendungen im Bereich elektronischer Bauteile und Systemkomponenten vorgestellt.

7. Empfehlungen und Praxisbeispiele

Während der Durchführung der Untersuchungen des Prägefoliendrucks im Rahmen dieser Arbeit konnten neue Erkenntnisse über den Prägefoliendruck gewonnen werden. In diesem Kapitel werden die Empfehlungen für den Prägefoliendruck von elektronischen Bauteilen zusammengefasst. Dabei werden einige Details erläutert, die während des Prägefoliendruckprozesses zu beachten sind. Die Empfehlungen erfolgen sowohl für die Prozessmaterialien als auch für die Prozessparameter und sind auf ein beliebiges „Flach auf Flach“-Prägefoliendrucksystem übertragbar.

Im Rahmen der Arbeit zeigte sich auch, dass das Prägefoliendruckverfahren über ein großes Potenzial für die Anwendung im Elektronikbereich verfügt. In diesem Zusammenhang werden in diesem Kapitel zwei Beispielanwendungen des Prägefoliendrucks in Kombination mit anderen Techniken vorgestellt, die nicht nur einen Nachweis für die Einsatzmöglichkeiten des Prägefoliendrucks im Elektronikbereich, sondern auch einen Ausblick auf zukünftige Anwendungen dieser Technologie geben.

7.1 Erkenntnisse für die Anwendung des Prägefoliendrucks im Elektronikbereich

7.1.1 Prägewerkzeuge

Noch beim Gestalten des Layouts sollen die Abstände zwischen den Prägestrukturen möglichst groß gewählt werden. Der minimale mögliche Zwischenabstand hängt von der Prägestrukturform und -größe ab und kann mit wenigen Millimetern abgeschätzt werden.

Bei der Auswahl der Prägestrukturgrößen im Layout ist mit einer Größenzunahme während des Prägewerkzeuggravierprozesses zu rechnen. Die Zunahme nimmt mit den Prägestrukturgrößen ab und hängt sowohl vom Prägewerkzeugwerkstoff als auch vom Hersteller ab. Um die gewünschte Prägestrukturgröße zu erreichen, sollen die Prägewerkzeuge vor dem Prägefoliendruck mit optischer Messtechnik vermessen und die Abweichung in der Größe im Layout angepasst werden (siehe Abschnitt 4.2.3). Ohne große Prozessunsicherheit können die Prägestrukturen ab 100 µm im Layout graviert werden. Dabei ist mit einer Zunahme der gravierten Prägestrukturen, abhängig vom Werkstoff, zwischen 20 % und 75 % (Orientierungswerte) zu rechnen (siehe Abb. 7.1).

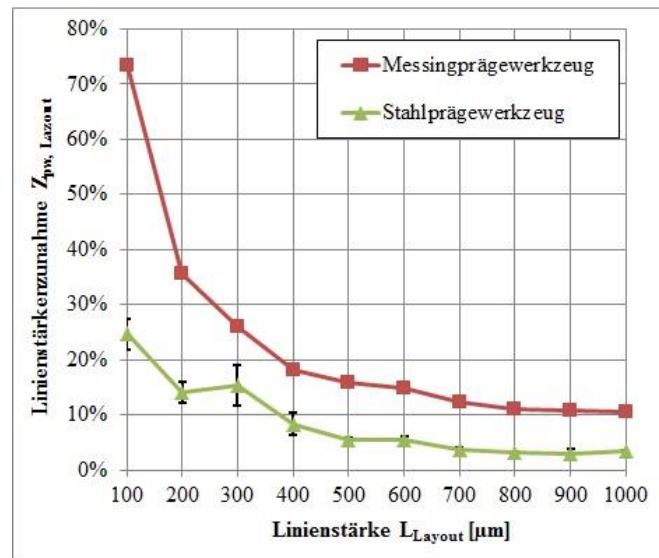


Abb. 7.1: Kennlinie zur Kompensation der Linienstärkenzunahme $Z_{pw,Layout}$ (nach Gleichung 4.1 auf Seite 48) der Prägewerkzeuge aus Messing und Stahl, die durch den Gravierprozess entstehen kann (entstanden durch die Vermessungen zwei Prägewerkzeuge).

Stahlprägewerkzeuge können feiner und genauer bearbeitet werden. Die in der Arbeit festgestellten minimalen gravierten Linienstärken liegen für das Stahlprägewerkzeug bei $62 \mu m$ und für das Messingprägewerkzeug bei $120 \mu m$. Diese Größen sind als Orientierungswerte für das Gravieren anzunehmen und im Praxisfall nochmal zu überprüfen. Gleichzeitig bedeuten die Stahlprägewerkzeuge für die Prägefoliendruckproduktion höhere Prägetemperaturen im Vergleich zu Messingprägewerkzeuge und sind wesentlich teurer.

Die Höhe der erhabenen Stellen beim Prägewerkzeug soll möglichst hoch (nach [PAT75] zwischen $0,5 \text{ mm}$ und $1,5 \text{ mm}$) ausgewählt werden. Dies gewährleistet eine feine Auflösung der geprägten Strukturen und eine saubere Wiedergabe der Zwischenabstände. Dementsprechend kann die Bearbeitungsmethode der Prägewerkzeuge beliebig gewählt werden. Die Voraussetzung dafür ist die Gewährleistung der minimal nötigen Höhe der erhabenen Stellen.

Um eine möglichst gute Homogenität, Miniaturisierung und Wiederholbarkeit der geprägten Strukturen zu sichern, sollen die erhabenen Stellen regelmäßig gereinigt, von Prägefölienresten befreit und nachgearbeitet (z. B. durch das Polieren der erhabenen Stellen) werden. Um die nötige Häufigkeit der Reinigung zu bestimmen, können die Prägewerkzeuge mittels eines Mikroskops oder einer Lupe kontrolliert werden. Für einen besseren Prozessablauf sollen die Prägewerkzeuge regelmäßig ausgetauscht werden. Die in der grafischen Industrie nicht relevante Abnutzung des Prägewerkzeuges kann die Qualität der elektronischen Bauteile stark beeinflussen.

Zur Qualitätssicherung sollen die Prägewerkzeuge vor dem Einsatz auf die Dickentoleranz und Ebenheit der Fläche geprüft werden.

7.1.2 Prägefolien

Die Mehrzahl der metallisierten Prägefolien auf dem Markt haben Aluminium- oder Goldgrundsichten, deren Schichtdicken in nm-Bereich liegen. Allerdings besteht bei der Auswahl einer passenden Prägefolie die Schwierigkeit, dass es keine Herstellerangaben zu den meisten Prägefolien gibt und keine Hinweise auf ihre mögliche Leitfähigkeit. Daher wird empfohlen, einige Muster der metallisierten Prägefolien vorher zu testen.

Als erste Voraussetzung soll die visuelle Qualität der gewählten Prägefolie geprüft werden. Im Allgemeinen weisen die Prägefolien eine gute Homogenität der einzelnen Schichten auf, die im Prägefoliendruckprozess durch die Auswahl der am besten geeigneten Prozessparameter maximal ausgenutzt werden soll. Damit kann auch die Wiederholbarkeit später erwarteter elektrischer Eigenschaften der geprägten Strukturen vorausgesetzt werden.

Als zweite Voraussetzung soll die elektrische Leitfähigkeit der Metallisierung der Prägefolie nachgewiesen werden. Diese kann durch die in dieser Arbeit beschriebenen Methode mit der Entfernung der Schutzschicht mit den Resten der Ablöseschicht in einer Plasmaanlage und nachfolgender Flächenwiderstandsmessung festgestellt werden (siehe Abschnitt 4.3.1.1). Eine relativ genauere Alternative zu dieser Methode kann ohne Schichtentfernung mittels eines berührungslosen Flächenwiderstandsmessgeräts z. B. der Firma NAGY Messsysteme GmbH [NAG14] durchgeführt werden. Dieses System erlaubt eine berührungslose Messung des Flächenwiderstands beliebiger Metallschichten, die auch mit einer Isolationsschicht geschützt sein können.

Tabelle 7.1: Übersicht über 16 ausgewählte Prägefolien, ihre Bezeichnung, Hersteller/Vertrieb und elektrische Flächenwiderstände (gemessen nach dem Verfahren von van der Pauw [VAN58] am 4-Punktmessstand).

#	<i>Hersteller/Vertrieb</i>	<i>Prägefolienbezeichnung</i>	<i>Elektrischer Flächenwiderstand [Ω/\square]</i>
1	HS Strambach Neuffer GmbH	HS 19-3	2,95
2	LEONHARD KURZ	ALUFIN SH	4,73
3	Baier GmbH	Baier J 615	9,45
4	HS Strambach Neuffer GmbH	HS 12-110	53,77
5	HS Strambach Neuffer GmbH	HS 121-110	124,40
6	LEONHARD KURZ	Luxor GTS Premium 355	309,97
7	LEONHARD KURZ	Luxor SH 220	316,15
8	LEONHARD KURZ	ALUFIN SFX	413,19
9	Baier GmbH	Baier J 916	1.060,00
10	LEONHARD KURZ	Luxor SFX 220	1.420,00
11	WS Industrieservice GmbH	6110 LC	1.650,00
12	Baier GmbH	Baier F-3	23.160,00
13	HS Strambach Neuffer GmbH	HS 45-110	28.660,00
14	WS Industrieservice GmbH	PF100G	38.800,00
15	Baier GmbH	Baier F-5	> 200.000,00
16	Baier GmbH	Baier C620	> 200.000,00

Je nach Anwendung soll eine passende Prägefolie ausgesucht werden, deren elektrische Eigenschaften den Anforderungen entsprechen. Es existieren Prägefolien mit elektrischem Flächenwiderstand sowohl im Ω/\square -Bereich, als auch im $k\Omega/\square$ -Bereich. Hilfreich kann auch Tabelle 7.1 aus Abschnitt 4.3.1 sein.

In einem für die Produktion optimalen Fall soll eine Prägefolie mit möglichst niedriger nötiger Prägetemperatur beim Prägefoliendruckvorgang ausgewählt werden.

7.1.3 Substrate

Bei Auswahl der Substrate für den Prägefoliendruck von elektronischen Bauteilen sollen folgende Erkenntnisse berücksichtigt werden: Die meisten Kunststofffolien, die für die druckbare Elektronik eingesetzt werden [KAM11, KO07, MOL11], haben ca. 150 °C als obere Bearbeitungsgrenze, die je nach Wärmeeinflussdauer sinken kann. Oberhalb von 150 °C treten unerwünschte Deformationen und andere Effekte am Substrat auf. Um die spürbare Einprägung der Prägefolie in das Substrat zu vermeiden, soll die Schichtdicke des Substrats minimal (unter 200 μm) gewählt werden. Für den besseren und homogenen Übertrag der Prägefolie auf das Substrat kann die genutzte Seite oder die genutzten Seiten des Substrats gereinigt und, um eine niedrige Oberflächenenergie des Substrats zu erreichen, z. B. in einer Korona- oder Plasmaanlage voraktiviert werden.

Im Allgemeinen können auch weitere Materialien (Papier, Metall mit Isolationsschicht, Glas) als Substrate für den Prägefoliendruck der elektronischen Bauteile in Betracht gezogen werden. Dabei soll eine Haftung der Transferschichten der Prägefolie auf derartigen Substraten vorausgesetzt werden. Die thermische, mechanische und chemische Beständigkeit des Substrats soll je nach Einsatzgebiet der Prägegüter im Voraus bestimmt werden.

7.1.4 Prägeunterlagen

Wenn bei elektronischen Bauteilen feine Strukturen (in wenigen Millimeter Bereich) im Layout vorgesehen sind, soll eine möglichst harte Prägeunterlage (z. B. Metall oder Hartkunststoff) verwendet werden. Durch die Härte der Prägeunterlage werden auch die Deformationen im Substrat reduziert. Allerdings sollen dabei die thermischen Eigenschaften der Prägeunterlage berücksichtigt werden: je niedriger der Wärmeleitfähigkeitswert des Materials ist, desto geringer ist der unerwünschte Einfluss auf die Prägeergebnisse durch die Erwärmung der Prägeunterlage während des Prägefoliendruckvorgangs.

Außerdem soll die Prägeunterlage regelmäßig sowohl auf die Homogenität und Ebenheit der Fläche als auch die Dickentoleranz visuell oder mittels spezieller Messtechnik überprüft und bei Bedarf komplett ausgetauscht werden. Ein Ausgleich der inhomogenen Anpressdruckverteilung während des Prägefoliendrucks ist durch die Patrizen oder das Papier möglich, allerdings nicht erwünscht, da eine exakte Prozesswiederholbarkeit nicht mehr garantiert werden kann.

Bei einem Prägewerkzeug mit vollflächigen Prägestrukturen ist die Nutzung von Papier oder dickerem Karton (im Format der Prägeunterlage) zusätzlich zu einer Hartprägeunterlage empfehlenswert, um die Inhomogenität der Anpressdruckverteilung zu kompensieren.

7.1.5 Prägetemperatur

Entsprechend der im Rahmen der Arbeit durchgeführten Temperaturmessungen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen: Um eine ausreichende Prägetemperatur an den industriellen Prägefoliendruckmaschinen zu gewährleisten, soll eine ausreichende Zeit für das Aufheizen der Prägeeinheit eingeplant werden. Sie liegt bei mindestens 30 Minuten und ist stark von Aufbau und Größe der Prägeeinheit und ihren Bestandteilen abhängig. Für das Nachheizen einer bereits erwärmten Prägeeinheit auf eine andere Soll-Temperatur ist mit 2/3 der Aufheizzeit zu rechnen.

Bei der Auswahl der Soll-Temperatur ist mit einer Abweichung der an der Prägefoliendruckmaschine angezeigten Ist-Temperatur zu der auf der Prägewerkzeugoberfläche tatsächlichen herrschenden Prägetemperatur zu rechnen. Dieser Unterschied hängt von der Position der Temperaturkontrollsensoren und Aufbau der Prägeeinheit ab. Dabei ist mindestens eine 10 °C-Differenz zwischen Ist- und Prägetemperatur anzunehmen. Eine grobe Einschätzung der Prägetemperatur und ihre Verteilung über die Oberfläche des Prägewerkzeuges kann mittels eines einfachen Temperaturmessgeräts z. B. testo 735-1 [TES13] durchgeführt werden. Die Minimierung der Temperaturinhomogenität auf der Prägewerkzeugoberfläche kann durch die Findung der niedrigsten ausreichenden Soll-Temperatur realisiert werden.

Beim Produktionsprozess mit in kurzen Abständen nacheinander folgenden Prägefoliendruckvorgängen ist mit einem Temperaturanstieg in der Prägeeinheit zu rechnen, welcher durch das gleichzeitige Nachheizen der Prägeeinheit zu Stande kommen kann. Diese kann beispielsweise durch die Modifizierung des Regelungssystems der Prägeeinheit optimiert werden. Bei der Prägeunterlage ist eine Temperaturerhöhung ebenfalls zu erwarten. Sie kann durch die Verwendung schlecht wärmeleitender Materialien oder durch Einbau eines zusätzlichen Abkühlsystems für die Prägeunterlage minimiert werden.

Um die Wiederholbarkeit der Prägegüter zu gewährleisten, sollen die Umgebungsbedingungen und vor allem die Lufttemperatur im Arbeitsraum, die einen direkten Einfluss auf die Prägetemperaturen hat, konstant gehalten werden.

7.1.6 Prägezeit

Die gewählte Prägezeit soll nicht nur zur Beschleunigung des Herstellungsprozesses, sondern auch, um die Größenzunahme der geprägten Strukturen zu minimieren, kleinstmöglich gewählt werden. Die Prägezeitverkürzung kann durch die Erhöhung der Soll-Temperatur oder des Anpressdrucks kompensiert werden. Dabei ist allerdings eine Prägetemperatursteigerung während mehrerer Prägefoliendruckvorgänge zu berücksichtigen bzw. durch den Einbau eines optimalen Temperaturregelungssystems für die Prägeeinheit zu kontrollieren.

7.1.7 Anpressdruck

Bei der Installation und nach jedem Transport soll die Prägefoliendruckmaschine am besten vom Hersteller neu kalibriert werden. Dies umfasst eine Überprüfung der Position der Prägefoliendruckmaschine und des absoluten Werts des Anpressdrucks und seine Verteilung während des Prägefoliendruckvorgangs.

Der Anpressdruck soll, ebenso wie die anderen zwei Prozessparameter: Prägetemperatur und Prägezeit, möglichst minimal gewählt werden, um die Deformation des Substrats und die Tiefe der Einprägung zu senken.

7.1.8 Prägegüter

Wie bei den entstandenen Prägegütern zu sehen ist, zeigen die geprägten Linien 1-10 (von 10 μm bis 100 μm) eine große Prozessunsicherheit des Prägefoliendrucks, die durch die Kantenrauheit verursacht ist. Auf Basis dieser Erkenntnis kann als untere Grenze der im Layout vorgegebenen Strukturgröße 200 μm gesetzt werden. Je nach Prägewerkzeugbearbeitung ist bei Prägegütern der Wert über 300 μm zu erwarten (bei allein stehenden geprägten Strukturen). Oberhalb von diesem Wert können die geprägten Strukturen vorhersagbar und ohne große Prozessunsicherheit produziert werden. Mit Erhöhung der vorgegebenen Prägestrukturgröße sinkt die Größenzunahme (in Experimenten Linienstärkenzunahme $Z_{pl,pw}$, Gleichung 6.1 auf Seite 102), die durch den Prägefoliendruckprozess verursacht wird.

Zusätzlich können die Ergebnisse aus Abschnitt 6.7 eingesetzt werden. Da der Einfluss durch die untersuchten Prozessparameter, Prägewerkzeuge und Prägefolien auf die geprägten Linien minimal ist und sich als Mittelwert bei 2 % befindet (siehe Tabelle 6.3 auf Seite 123), kann die Kennlinie in Abb. 7.2 zur Bestimmung der geprägten Linienstärken benutzt werden.

Die weitere Beurteilung der Prägeergebnisse kann visuell erfolgen. In diesem Fall sollen allerdings die Qualität des Gravierens des Prägewerkzeuges und die dadurch entstehende Linienstärkenzunahme in Bezug auf das Layout bekannt oder kompensiert sein.

Die Prägegüter mit einer Kunststoffolie als Substrat sind flexibel und weisen beim Biegen keine visuell erkennbaren Unterbrechungen der geprägten Schichten auf. Jedoch können sich die Klebe- und Schutzschichten der Prägefolien durch den Einfluss von Chemikalien oder Reinigungsmitteln lösen, was zur Beschädigung des elektronischen Bauteils führt.

Aus den während der Arbeit entstandenen Erfahrungen geht außerdem hervor, dass die Klebe- und Schutzschichten der meisten Prägefolien elektrisch gut isolierend sind. Dies hat sowohl Vorteile, als auch Nachteile. Vorteilhaft ist, dass die zusätzlichen Schichten die Metallisierung vor mechanischen und weiteren möglichen Einflüssen von außen schützen. In diesem Fall wird eine zusätzliche Verkapselung nicht notwendig. Nachteilig ist, dass diese Schichten ein direktes Aufbringen weiterer funktionaler Schichten und den damit verbundenen Aufbau eines mehrschichtigen elektronischen Bauteils erschweren. Des Weiteren ist eine direkte Kontaktierung der geprägten Strukturen mit dem Gesamtsystem nicht möglich.

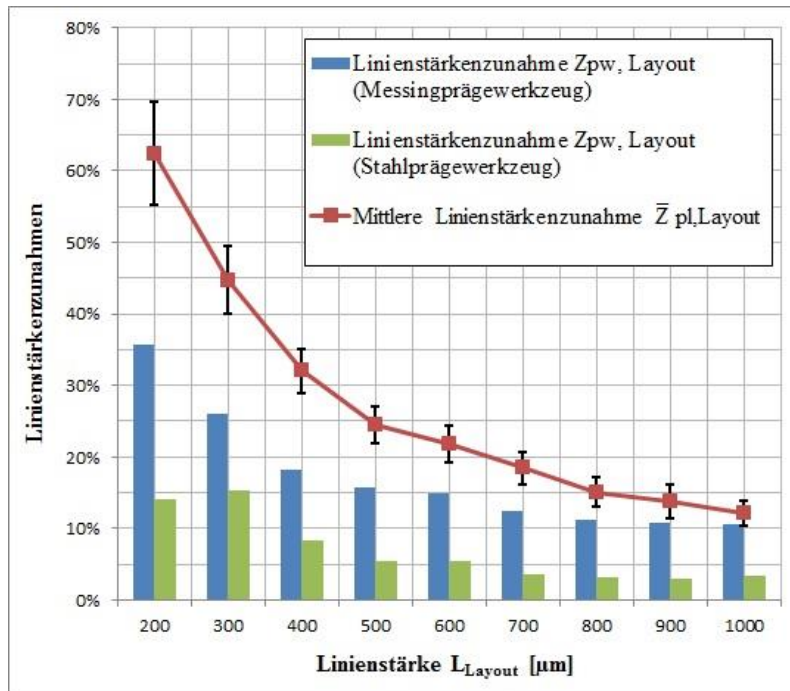


Abb. 7.2: Kennlinie zur Kompensation der Liniestärkezunahme $\bar{Z}_{pl, Layout}$ (nach Gleichung 6.2 auf Seite 102) im Prägefoliendruck der Linien mit im Layout vorgegebenen Liniestärke L_{Layout} zwischen 200 μm und 1000 μm . Die Werte $Z_{pw, Layout}$ (nach Gleichung 4.1 auf Seite 48) stellen die Liniestärkezunahme während des Gravierprozesses der Messing- und Stahlprägewerkzeuge dar.

Das Problem mit der Kontaktierung der geprägten Strukturen wird gelöst, indem die Schutzschicht mit den Resten der Ablöseschicht partiell an den Kontaktflächen in einer Plasmaanlage entfernt wird (siehe Abschnitt 4.3.1.1). Dies erlaubt einen direkten Zugang zur Metallisierung der Prägefolie (ohne den Rest des Prägegutes zu zerstören) und nachfolgendes Aufbringen der Metalldrähte (z. B. mittels eines Leitklebers). Alternativ zur Entfernung der Schutz- und Ablöseschichten der Prägefolie können die geprägten Strukturen an den Kontaktstelle mittels der Niettechnik und damit mit dem Gesamtsystem kontaktiert werden.

7.2 Sensorstrukturen

Außer den geprägten Leiterbahnen (im Verlauf der Arbeit geprägte Strukturen genannt), die während dieser Arbeit entstanden sind, kann sich die Sensorik zum weiteren Anwendungsfeld des Prägefoliendrucks entwickeln.

Im Rahmen dieser Arbeit konnten die Strukturen mit einer minimalen Liniestärke von über 100 μm geprägt werden, welche noch durch die große Prozessunsicherheit des Prägefoliendrucks beeinflusst sind. Eine weitere Reduzierung der Größe der geprägten Strukturen ist allerdings mit den konventionellen und in der Praxis benutzten Prozessmaterialien, wie Prägewerkzeugen und Prägefolien, schwer realisierbar. In der grafischen Industrie war dies bisher nicht notwendig.

Hieraus folgt die Überlegung, das Prägefoliendruckverfahren mit anderen Technologien zu kombinieren und die Grenzen des konventionellen Verfahrens zu erweitern. Dabei kann die Lasertechnologie zum Einsatz kommen. Um die Strukturgröße zu senken, können die

Prägefolien mit einem Lasersystem strukturiert werden. Die Kombination von zwei Verfahren, Prägefoliendruck und Laserstrukturierung, kann in zwei Varianten realisiert werden.

Für die erste Variante wird eine ungeprägte Prägefolie hier z. B. mit dem Lasersystem F-9020 (mit integrierten Faserlaser) der Firma KBA-Metronic GmbH [KBA13] vorstrukturiert. Diese Variante ist bei einer Patentrecherche unter Erfindungsnummer DE 201 15 299 U1 [PAT99] auffindbar. Dazu sind allerdings keine Anwendungsbeispiele bekannt.

Im ersten Schritt werden dort, wo kein Prägefolientransfer stattfinden soll, alle auf dem Polyesterträger aufgetragenen Schichten der Prägefolie mittels des Lasers abgetragen (siehe Abb. 7.3). Im nächsten Schritt wird die vorstrukturierte Prägefolie mit einem vollflächigen Prägewerkzeug (das Prägemotiv ist eine Vollfläche) auf das Substrat übertragen (siehe Abb. 7.4). Bei geeigneten Prozessparametern des Prägefoliendrucks werden die vorgelaserten Strukturen der Prägefolie komplett auf das Substrat transferiert.

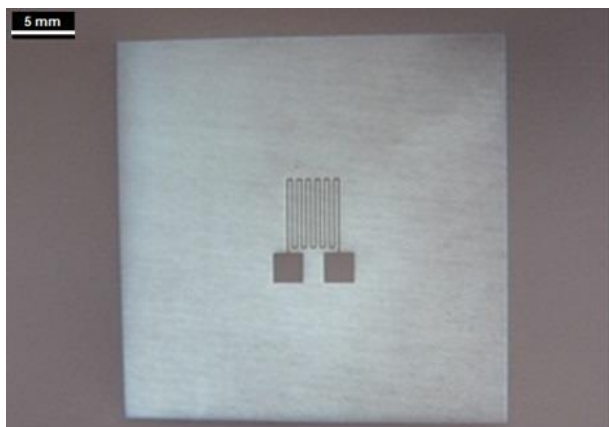


Abb. 7.3: Mit dem KBA-Lasersystem vorstrukturierte Prägefolie HS 19-3 mit dem Layout einer Sensorstruktur.

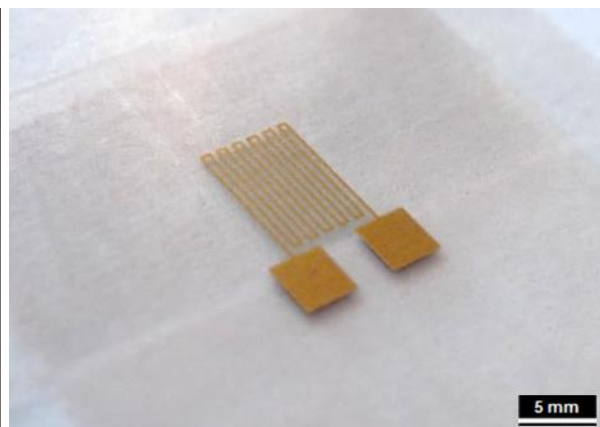


Abb. 7.4: Auf das Substrat übertragene vorstrukturierte Prägefolie HS 19-3 mit dem Layout einer Sensorstruktur.

Alternativ bzw. als zweite Variante können die auf das Substrat vollflächig übertragenen Transferschichten der Prägefolien mit dem Laser strukturiert werden. Diese Variante funktioniert ebenfalls, wobei zumindest eine minimale Beschädigung des Substrats nicht zu vermeiden ist.

Mit der Kombination des Prägefoliendrucks und der Lasertechnologie können nicht nur feinere Strukturen hergestellt, sondern auch ihre Zwischenabstände verkleinert und die Kantenrauheit verbessert werden. In Abb. 7.6 ist eine Leica-Aufnahme der mittels dieser Methode hergestellten Sensorstrukturen abgebildet. Im Vergleich mit den feinsten, mittels des konventionellen Prägefoliendrucks, geprägten Strukturen (siehe Abb. 7.5) verfügt sie über die feineren Linienstärken, die außerdem mit den Zwischenabständen bei nur ca. 150 µm hergestellt werden konnten. Bei solchen Strukturen ist eine vergleichsweise bessere Kantenrauheit festzustellen, die in erster Linie durch die Qualität der Laserstrukturierung (vergleiche Abb. 7.6 und Abb. 6.9 auf Seite 97) und beispielsweise nicht durch das Abziehen des Polyesterträgers bestimmt wird. Dies kann einen direkten Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften der Bauteile haben. Da die vorstrukturierten Prägefolien außerdem mit einem

vollflächigen Prägewerkzeug auf das Substrat übertragen werden, sind keine partiellen Deformationen des Substrats während des Prägefoliendrucks festzustellen.

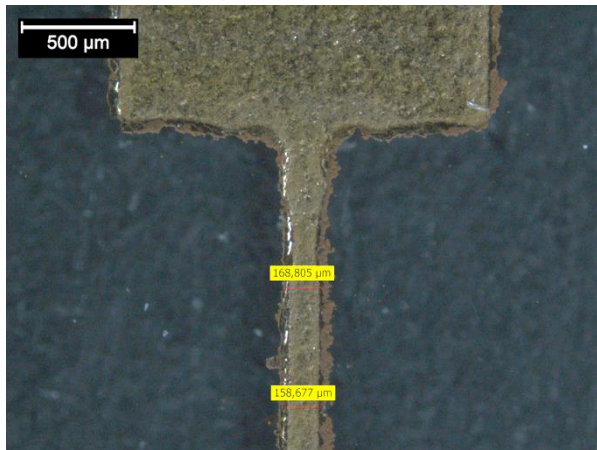


Abb. 7.5: Leica-Aufnahme der mit dem konventionellen Prägewerkzeug (Messing) geprägten Linie 1 der Prägefolie HS 19-3. 50-fache Vergrößerung.

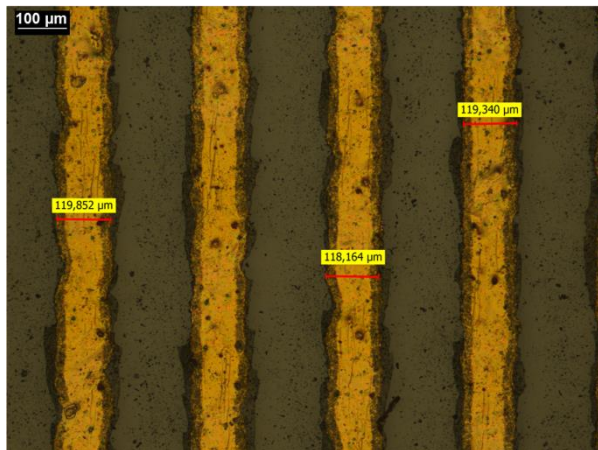


Abb. 7.6: Leica-Aufnahme der durch die Kombination des Prägefoliendrucks mit der Lasertechnologie erzeugten Sensorstruktur der Prägefolie HS 19-3. 200-fache Vergrößerung.

Die minimal mögliche Strukturgröße ist von den Grenzen des Lasersystems und der Qualität der Prägefolie abhängig. Die mit dieser Methode erreichbaren Strukturgrößen sind mit konventionellen Prägewerkzeugen nicht realisierbar. Zum Vergleich ist in Abb. 7.7 eine Sensorstruktur, die mit einem konventionellen Prägewerkzeug geprägt wurde, dargestellt. In Abb. 7.8 ist eine wesentlich kleinere Sensorstruktur, die durch die Kombination des Prägefoliendrucks mit der Lasertechnologie erzeugt wurde, abgebildet.

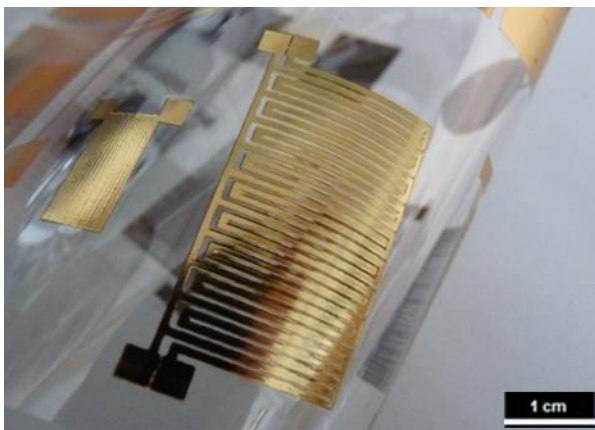


Abb. 7.7: Mit einem konventionellen Prägewerkzeug hergestellte Sensorstruktur mit Linienstärken von ca. 1000 µm; Prägefolie HS 19-3.

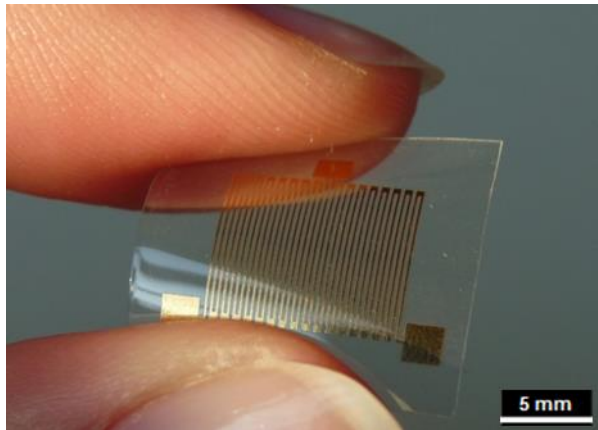


Abb. 7.8: Durch die Kombination des Prägefoliendrucks mit der Lasertechnologie erzeugte Sensorstruktur mit Linienstärken von ca. 150 µm; Prägefolie HS 19-3.

Zu weiteren Vorteilen dieser Methode kann die erwartete Senkung der Herstellungskosten, vor allem bei kleineren Auflagen und individuellen Bauteilen, gezählt werden. Beim Einsatz dieser Methode fallen keine Kosten für neue Prägewerkzeuge an, deren Herstellung ergänzend langwierig und aufwändig ist. Das Layout gewünschter Strukturen kann flexibel,

mit minimalen Zeitverlusten in einem Grafikprogramm oder auch direkt im Bedienerprogramm des Lasersystems während des Produktionsbetriebs verändert werden.

Die Kombination des Prägefoliendrucks mit der Lasertechnologie wurde am Beispiel verschiedener Sensorstrukturen (Dehnungsmessstreifen, Thermosensoren) getestet, deren Funktionalität nachgewiesen wurde (Abb. 7.8). Da die Schichtdicke der Metallisierung der meisten Prägefolien im nm-Bereich liegt, weisen die miniaturisierten elektronischen Bauteile hohe Widerstandswerte (im k Ω -Bereich) auf. Hieraus folgend kann die Möglichkeit zu weiterer Miniaturisierung der Strukturen mit gleichzeitiger Reduzierung des Widerstands ausgenutzt werden. Für jede Anwendung und die dafür benötigten elektrischen Eigenschaften sollen die Prägefolie und das Layout des Bauteils passend und untereinander abgestimmt gewählt werden.

7.3 Methode zur Kontaktierung gedruckter Schichten

Ein interessantes Feld im Bereich der druckbaren Elektronik ist die Kontaktierung der elektronischen Bauteile. In der Kontaktierung konventioneller Elektronik hat sich das Löten durchgesetzt, das eine sichere Verbindung zu den Makrostrukturen, wie z. B. Kontaktdrähten, leistet [ROS13]. Diese Technik ist jedoch nicht ohne weiteres auf gedruckte elektronische Bauteile übertragbar, da die gedruckten Strukturen aufgrund ihrer kleinen Schichtdicke und ihrer Materialeigenschaften durch das Löten zerstört werden und ihre Funktionalität verlieren können [PAT39, SCH03]. Dieses Problem bedingt gleichzeitig auch, dass weitere Verbesserungspotenziale bei den gedruckten elektrisch leitenden Strukturen nicht einsetzbar sind. Um die Integrierbarkeit der gedruckten elektronischen Bauteile zukünftig zu erleichtern, wurde eine Methode zur Kontaktierung mittels des Prägefoliendrucks entwickelt [LYA12a]. Die Kontaktierung der dünnen gedruckten elektrisch leitfähigen Schichten kann durch zwei Varianten realisiert werden.

Bei der ersten Variante werden im ersten Schritt Kontaktpads aus einer 4-25 μm dünnen Metallfolie ausgestanzt. Dies erfolgt entweder extern mit einer Ausstanzeinrichtung oder mittels eines Prägewerkzeuges an der Prägefoliendruckmaschine gleichzeitig mit weiteren Prozessschritten. Als nächstes wird auf die Kontaktstellen des Substrats, auf denen danach ein feiner Metalldraht und das ausgestanzte Kontaktpad positioniert werden, Leitkleber aufgebracht. Im letzten Schritt wird dieser Aufbau mit einem vollflächigen Prägewerkzeug gepresst. Das Fixieren der Kontaktpads auf dem Substrat erfolgt durch den aufgetragenen Leitkleber, der aufgrund der Wärme des Prägewerkzeuges schnell austrocknet und durch den Anpressdruck gleichmäßig unter dem Kontaktpad verteilt wird. Der Leitkleber übernimmt die Funktion der elektrischen Verbindung zwischen Kontaktpad und Metalldraht.

Die Kontaktpads können danach in einem dafür geeigneten Druckverfahren mit beliebigen Strukturen überdruckt und mit dem bereits zur Verfügung stehenden Metalldraht mit dem Gesamtsystem kontaktiert werden. Schematisch sind die Prozessschritte der Kontaktierungsmethode in Abb. 7.9 dargestellt.

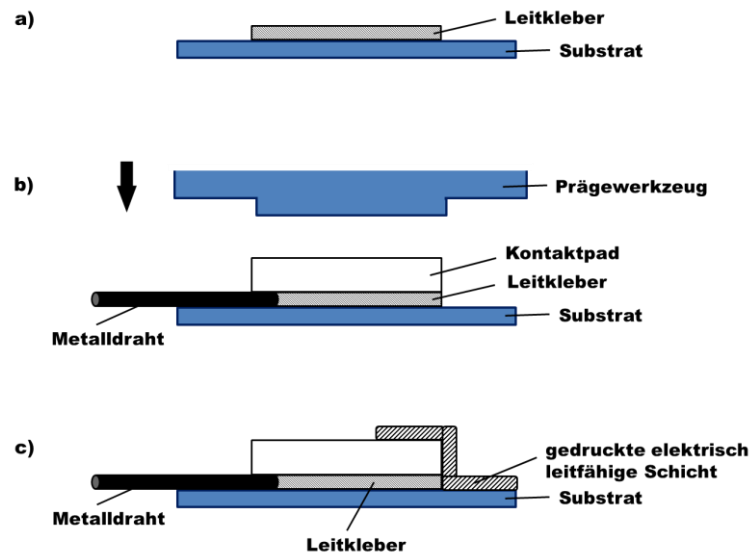


Abb. 7.9: Skizze der Methode zur Kontaktierung gedruckter elektrischer leitender Schichten: Variante 1. a) Aufbringen des Leitklebers auf die Kontaktstelle auf dem Substrat; b) Positionierung des Metalldrahts und des Kontaktpads auf die Kontaktstelle des Substrats mit dem anschließenden Pressen mit dem Prägewerkzeug; c) Überdrucken des Kontaktpads mit der elektrisch leitfähigen Schicht.

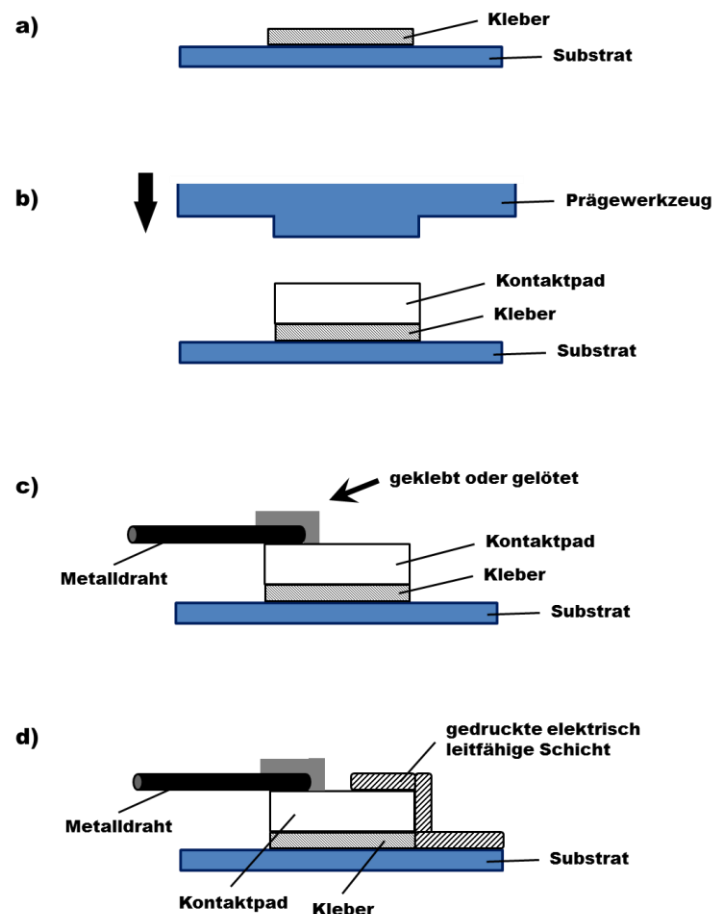


Abb. 7.10: Skizze der Methode zur Kontaktierung gedruckter elektrischer leitender Schichten: Variante 2. a) Aufbringen des Klebers auf die Kontaktstelle auf dem Substrat; b) Positionierung des Kontaktpads auf die Kontaktstelle des Substrats mit dem anschließenden Pressen mit dem Prägewerkzeug; c) Kleben oder Löten des Metalldrahts auf dem Kontaktpad; d) Überdrucken des Kontaktpads mit der elektrisch leitfähigen Schicht.

Bei Verwendung eines z. B. zum Löten geeigneten Metalls für die Kontaktpads kann das Integrieren des Metalldrahts als ein weiterer Prozessschritt nach dem Aufbringen des Kontaktpads erfolgen. Bei dieser zweiten Variante wird der Metalldraht vor dem Überdrucken auf das Kontaktpad gelötet, ohne die gedruckten Schichten zu beschädigen, oder mittels des Leitklebers geklebt (Abb. 7.10). Dabei ist es nicht unbedingt notwendig, einen Leitkleber zwischen Substrat und Kontaktpad zu verwenden. Die Fixierung kann auch mittels eines für diese Materialien geeigneten Klebers erfolgen.

Ein erster Vorteil bei der Anwendung geprägter Kontaktpads liegt darin, dass beliebig dünne gedruckte Schichten kontaktiert werden können, ohne dabei Rücksicht auf deren Materialeigenschaften nehmen zu müssen. Ein zweiter Vorteil ist der, dass das Aufbringen des Kontaktpads und der Verdrahtung vor dem Druckvorgang abgeschlossen ist, was einen zusätzlichen Einfluss auf die gedruckten Schichten ausschließt. Einen dritten Vorteil bringen übergeprägte Metalldrähte, die innerhalb eines Prozessvorgangs zeitgleich mit den Kontaktpads mitintegriert werden können. Dies erspart einen zusätzlichen Prozessschritt mit den dazu nötigen Anlagen und ermöglicht eine direkte Verbindung gedruckter elektronischer Bauteile nach außen bzw. mit dem Gesamtsystem. Außerdem können dabei die Kontaktpads aus einem beliebigen, nicht zwingend zum Löten geeigneten Metall hergestellt werden. Zusätzlich wird das Substrat nicht durch hohe Löttemperaturen [HER04, KIE01] belastet.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Eignung dieser Methode zur Kontaktierung gedruckter elektrisch leitender Schichten nachgewiesen. Die Funktionalitätsüberprüfung fand an unterschiedlichen Proben statt.

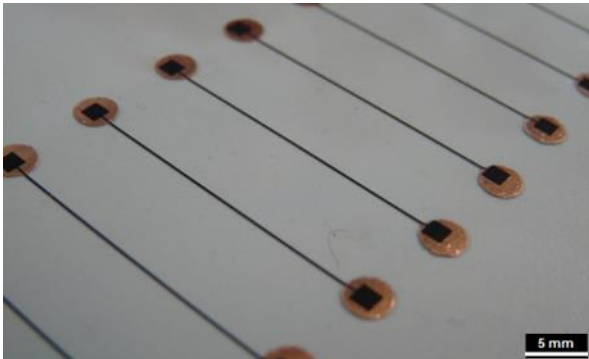


Abb. 7.11: Über 6- μm -dicke Kupferkontaktpads im Siebdruck gedruckte Grafitleiterbahnen. Substrat: PET-Folie.

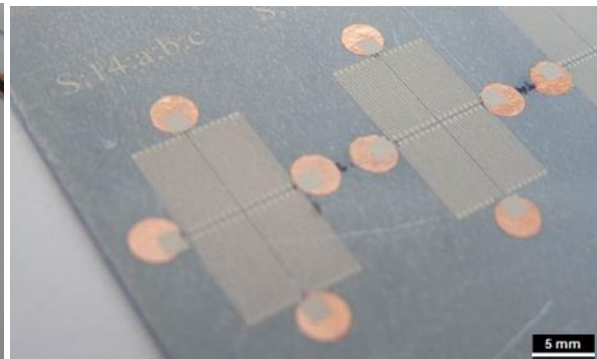


Abb. 7.12: Über 6- μm -dicke Kupferkontaktpads im Siebdruck gedruckte Silberfarbe-Dehnungsmessstreifen. Substrat: Stahlblech.

In Abb. 7.11 sind die mit einer Graphitdruckfarbe über die Kupferkontaktpads überdruckten Leiterbahnen dargestellt. Dabei sind die elektrisch leitfähigen Schichten auf einem flexiblen und transparenten Substrat, PET-Folie, gedruckt. Der Einsatz der entwickelten Methode gibt außerdem die Möglichkeit weitere Substrate zu benutzen. Dazu sind in Abb. 7.12 die auf einem Stahlblech gedruckten Dehnungsmessstreifen gezeigt. Die Kontaktflächen sind ebenfalls mit den Kupferkontaktpads vorgesehen.

Die genaue Vorgehensweise und die Ergebnisse der Untersuchung der vorgestellten Methode sind von der Autorin auf der LOPE-C Konferenz in Jahr 2012 veröffentlicht worden und in

der Veröffentlichung „Contacting method for printed electronics“ nachzuschlagen [LYA12a]. Außerdem wurde im Juni 2012 eine Patentanmeldung für diese Methode zur Prüfung an das Deutsche Patentamt eingereicht (DE 10 2012 105 334.0).

Mit den vorgestellten Praxisbeispielen der Anwendung des Prägefoliendrucks im Elektronikbereich zeigt das Verfahren eine bereits bestehende Möglichkeit des industriellen Einsatzes und ein großes Weiterentwicklungspotential für die Zukunft.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Entsprechend dem für diese Arbeit definierten Ziel wurde im Hinblick auf die Anwendung des Prägefoliendrucks im Elektronikbereich eine wissenschaftliche Untersuchung dieses Verfahrens, die gleichzeitig praxisorientiert ist, durchgeführt.

Zuerst fand in Kapitel 3 eine erstmalige Analyse des Prägefoliendruckvorgangs für die „Flach auf Flach“-Prägefoliendruckmaschinen mit der Definition seiner Teilprozesse statt. Nach der Festlegung der für diese Arbeit interessanten Teilprozesse des Prägefoliendruckvorgangs wurden das untersuchte Prägefoliendrucksystem und seine Systemgrenze beschrieben. Dazu wurden die relevanten Eingangs- und Ausgangsparameter aufgezählt. Des Weiteren wurden die aufgezählten Systemparameter zur Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit festgelegt und schrittweise untersucht.

In Kapitel 4 fand die Untersuchung der Prozessmaterialien als Eingangsparameter des betrachteten Prägefoliendrucksystems statt. Für die nachfolgenden Experimente wurden diese Prozessmaterialien entsprechend den Anforderungen an die Ausgangsparameter, nämlich der Einsatzfähigkeit der geprägten Strukturen als elektronische Bauteile oder deren Komponente, ausgewählt.

Die zwei gewählten und in der Praxis gängigen Prägewerkzeuge aus Messing und Stahl wurden mittels verschiedener Messtechnik genauer untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die Prägewerkzeuge einige Mängel hinsichtlich der Bearbeitungsqualität aufwiesen. Besonders waren davon die Oberflächenhomogenität und die Kantenrauheit der gravierten Strukturen betroffen. Die gravierten Strukturen wiesen außerdem eine vom Layout abweichende Prägestrukturgröße auf, die durch eine Kennlinie charakterisiert werden konnte. Diese Kennlinie kann zur Orientierung beim Gestalten des Layouts für das Prägemotiv verwendet werden. Durch eine Marktanalyse wurden 16 ausgewählte Prägefolien auf ihre Qualität beim Prägefoliendruck und elektrische Leitfähigkeit geprüft. Hierzu wurde eine Methode zur Bestimmung des Flächenwiderstands der Metallisierung der Prägefolien mittels Abtragen der Schutzschicht in der Plasmaanlage vorgestellt. Diese Methode kann zur Einschätzung der elektrischen Eigenschaften der Prägefolien benutzt werden. Die zwei nachfolgend für die Experimente in dieser Arbeit gewählten Prägefolien wurden im nächsten Schritt auf die Qualität der einzelnen Schichten und die Schichtdicken untersucht. Dabei wurde eine gute Homogenität, vor allem der Metallschichten der Prägefolien, bestätigt. Als Substrat für die Prägegüter wurde eine 125- μm -dicke PET-Folie verwendet, die oft aufgrund ihrer Flexibilität und Durchsichtigkeit bei der druckbaren Elektronik eingesetzt wird. Die Prägeunterlage, eine Stahlplatte, wurde vor dem Prägefoliendruck mikroskopisch untersucht. Dadurch wurden Bearbeitungsspuren auf der Oberfläche der Prägeunterlage gut sichtbar.

Des Weiteren wurden in Kapitel 5 die Prozessparameter, wie Soll-Temperatur und Anpressdruck, an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 genauer untersucht. Durch den während dieser Arbeit realisierten Temperaturmessaufbau an der GEBA 6 wurden die Temperaturen in der Prägeeinheit während des Aufheizens, während eines Prägefoliendruckvorgangs und unmittelbar danach nachverfolgt. Aufgrund dieser Temperaturmessungen wurde die nötige Aufheizzeit zu 35 Minuten definiert. Weitere Erkenntnisse lieferte die Differenz zwischen der Soll- und Prägetemperatur. Dazu konnte durch eine mit ANSYS-FEM-Simulation validierte Annahme die Kennlinie zur Kompensation der Prägetemperatur vor dem Prägefoliendruck speziell für die Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 ermittelt werden. Eine Streuung der Prägetemperaturen über die Oberfläche der Prägewerkzeuge sowie eine Temperaturerhöhung sowohl in der Prägeeinheit als auch in der Prägeunterlage während des Prägefoliendruckvorgangs stellen weitere wichtige Erkenntnisse des Kapitels 5 dar. Der Unterschied im Temperaturverlauf in der Prägeeinheit beim Einsatz verschiedener Prägewerkzeuge ist minimal. Der Prägefolienwechsel zeigte keine Änderung in den Temperaturmessergebnissen. Die Untersuchung des Anpressdrucks wies seine inhomogene Verteilung über die Fläche der Prägewerkzeuge nach.

In Kapitel 6 wurden die an der GEBA 6 durchgeführten Prägefoliendruckexperimente beschrieben, wobei jeweils ein Eingangsparameter variiert und die anderen konstant gehalten wurden. Die dabei entstandenen Prägegüter konnten zur Untersuchung der Ausgangsparameter des betrachteten Prägefoliendrucksystems einbezogen werden. Bei deren Untersuchung wurden die geprägten Strukturgrößen bzw. Linienstärken als eine Ausgangsgröße für quantitative Auswertung und Berechnung des Einflusses der Eingangsparameter auf die Prägeergebnisse verwendet. Damit konnte eine Erkenntnis über die Relevanz und die Größe des Einflusses der jeweiliger Prozessmaterialien und -parameter gewonnen werden. Die Prägeergebnisse werden in folgender Reihenfolge durch Prozessmaterialien und -parameter beeinflusst: Prägewerkzeug, Prägefolie, Soll-Temperatur, Prägezeit, Anpressdruck. Aus den entstandenen Ergebnissen konnte eine Kennlinie zur Kompensation der Linienstärkenzunahme der geprägten Strukturen in Bezug auf die im Layout vorgegebenen Linienstärken abgeleitet werden. Aufgrund starker Kantenrauheit der geprägten Strukturen ist die Kennlinie für Strukturgrößen ab 200 μm im Layout anzuwenden. Diese stellt das erste auffindbare Ergebnis zur Veränderung der Strukturgrößen im Prägefoliendruck dar und ist mit Überprüfung an einzelnen Prägegütern auf andere Prägefoliendrucksysteme übertragbar. Die weiteren untersuchten Ausgangsparameter der Prägegüter, der Prägewerkzeuge und der Prägeunterlage wurden zur Bestimmung eines qualitativen Zusammenhangs der Systemparameter einbezogen. Sowohl die Prägewerkzeuge als auch die Prägeunterlage zeigten eine Zustandsänderung nach einigen Prägefoliendruckvorgängen.

In Kapitel 7 wurden die während dieser Arbeit entstandenen Erkenntnisse über den Prägefoliendruck im Hinblick auf die Anwendung im Elektronikbereich zusammengefasst und als Praxisempfehlungen für den Anwender beschreiben. Außerdem wurden zwei Beispiele für den Einsatz des Prägefoliendrucks zur Herstellung elektronischer Bauteile und seiner Komponente vorgestellt.

Im Anschluss an diese Arbeit könnte die Untersuchung der weiteren beschriebenen und nicht untersuchten Eingangs- und Ausgangsparameter des betrachteten Prägefoliendrucksystems an der GEBA 6 oder einer anderen „Flach auf Flach“-Prägefoliendruckmaschine durchgeführt werden. Genauer sollten weitere Prägewerkzeuge, insbesondere die Möglichkeit der Qualitätsoptimierung der gravierten Prägestrukturen, Prägefolien und damit die Allgemeingültigkeit der Ergebnisse dieser Arbeit untersucht werden. Hierzu erscheint es am sinnvollsten auch die Untersuchung solcher Systemparameter, wie Abziehwinkel φ_{ab} , Abziehkraft F_{ab} und Abkühlzeit zu tätigen, da die prozesssichere Herstellung der geprägten Strukturen unter $200\text{ }\mu\text{m}$ nicht verstanden ist. Zusätzlich sollte eine geeignete Methode zur Feststellung und Untersuchung der elektrischen Eigenschaften der geprägten Strukturen gefunden werden. Die bestehende Möglichkeit mit dem Abtrag der Schutzschicht der Prägefolien mittels der Plasmaanlage erscheint ungenau und kann zu einer fehlerhaften Aussage führen.

Des Weiteren könnte, außer der Systemgrenze, die Prozessgrenze erweitert werden. Damit könnten mehrere Prägefoliendruckvorgänge, auch bei größeren Produktionsgeschwindigkeiten und bei Prägefoliendruckmaschinen anderer Typen, genauer betrachtet werden. Zusätzlich zu den aufgezählten Forschungsrichtungen im Anschluss zu dieser Arbeit könnte eine FEM-Simulation eines Prägefoliendruckvorgangs mit der Prägefolie, dem Substrat und der Prägeunterlage durchgeführt werden. Damit könnte ein Erkenntnis über die Wärmeausbreitung nicht nur in der Prägeeinheit sondern auch in der Prägefolie, dem Substrat und der Prägeunterlage erzielt werden, womit der Einfluss solcher Prozessparameter, wie Prägetemperatur und Anpressdruck, besser nachverfolgt werden könnte.

Literaturverzeichnis

- [ARB05] Arbeitskreis Prägefoliendruck e.V.: *Prägefoliendruck: Verfahren, Technik und Gestaltung*. Hüthig GmbH & Co. KG, Heidelberg, 2005. ISBN 3-7785-2968-4.
- [ARB12] Arbeitskreis Prägefoliendruck e.V.: <http://look-and-feel.net/>, 2012.
- [ARB84] Arbeitskreis Prägefoliendruck e.V.: *Der Prägefoliendruck in der grafischen Industrie: Begriffe*. Deutscher Drucker, Nr. 26, 30.08.1984.
- [BAI03] Baier GmbH + Co KG: *Heißprägen. Ein Buch für den Anwender*. Rudersberg, 2003.
- [BAI10] Baier GmbH + Co KG: *Betriebsanleitung: Heißprägemaschine Modell GEBA 6, Seriennr.: 09 034*. Rudersberg, 2010.
- [BAI12] Baier GmbH + Co KG: *Interne Dokumentation für die Heißprägemaschine Modell GEBA 6*. Rudersberg, 2012.
- [BEC00] H. Becker, U. Heim: *Hot embossing as a method for the fabrication of polymer high aspect ratio structures*. In: *Sensors and Actuators A, Physical*, Vol. 83, 2000, pp. 130–135.
- [BER14] G. Bertsche: *Das Rasterelektronenmikroskop (REM)*. Universität Tübingen. http://www.uni-tuebingen.de/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/Uni_Tuebingen/Fakultaeten/MathePhysik/Institute/IAP/F-Prakt/Anleitungen/REM_EDX.pdf&t=1389354407&hash=7b40dd788e4d1317cf7576fcf9f03f4e4c0b96a4, 09.01.2014.
- [BHA98] J. Bharathan, Y. Yang: *Polymer electroluminescent devices processed by inkjet printing: I. Polymer light-emitting logo*. In: *Applied Physics Letters*. 72, Nr. 21, 1998, pp. 2660–2662.
- [BLA05] A. Blayo, B. Pineaux. In: *Joint sOC-EUSAI Conference*, Grenoble, 2005.
- [BOE11] P. von Böckh, T. Wetzels: *Wärmeübertragung. Grundlagen und Praxis*. 4. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011. ISBN 978-3-642-15958-9.
- [BOH55] H. Bohse, H. Eckardt, P. Weyl: *Die industrielle Buchbinderei. Fertigungstechnik und Maschinenkunde*. Fachbuchverlag Leipzig, Leipzig, 1955.
- [BOL13] Bolta Werke GmbH: <http://www.bolta-gottmadingen.de/>, 31.05.2013.

- [BOS13] M. Bossard: *Kontaktlose Rauheitsmessung und Formmessung*. In: Fachtagung Produktionsmesstechnik. NTB Buchs, 2013.
http://institute.ntb.ch/uploads/media/Schaefer-Rauheit_Form.pdf, 03.01.2014.
- [CON02] K.-J. Conrad u. a.: *Taschenbuch der Werkzeugmaschinen*. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2002. ISBN 3-446-21859-9.
- [DGQ12] Deutsche Gesellschaft für Qualität 11 - 04 2012: *Managementsysteme – Begriffe. Ihr Weg zu klarer Kommunikation*. 10. Auflage, 2012. ISBN: 3-410-32326-6.
- [DIE09] Diener electronic GmbH + Co. KG: *Plasmatechnik*. 3. Auflage, 2009.
- [DIN09] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *Optisches Messen technischer Oberflächen. Messprinzipien und Begriffe*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich, 2009. ISBN 978-3-410-17133-1.
- [EGI90] F.D. Egitto: *Plasma etching and modification of organic polymers*. In: Pure & Appl. Chem., Vol. 62, No. 9, pp. 1699-1708, 1990.
- [FUE06] U. Fügmann, H. Kempa, K. Preißler, M. Bartzsch, T. Zillger, T. Fischer, G. Schmidt, N. Brandt, U. Hahn, A. C. Hübler: *Printed Electronics is Leaving the Laboratory*. In: mst news. Nr. 2, 2006, pp. 13–16.
- [GER72] C. W. Gerhardt, H. Widmann: *Geprägte Form. Embossed Forms*. Verlag der Peter-Press Christoph Kreickenbaum, Darmstadt, 1972.
- [GER73] C. W. Gerhardt: *Technologie und Praxis des Druckens und Prägens mit Farbfolien*. Polygraph Verlag GmbH, Frankfurt am Main, 1973.
- [GRA00] M. H. Grafmüller: *Prozeßmanagement in der Automobilindustrie. Betriebliche Umsetzung am Beispiel der Volkswagen AG*. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, Wiesbaden, 2000. ISBN 3-409-11711-3.
- [GRI13] S. Griesheimer: *Experimentelle Untersuchung zur Farbspaltung und Farbübertragung im Flexodruck*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2013. <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/3892>.
- [GRO09] K. Groth, G. Müller: *FEM für Praktiker. Band 3: Temperaturfelder. Basiswissen und Arbeitsbeispiele zu FEM-Anwendungen der Temperaturfeldberechnung – Lösungen mit dem FE-ANSYS*. 5. Auflage. Expert-Verlag, Renningen, 2009. ISBN 978-3-8169-2714-3.
- [HER04] E. Hering, B. Schröder: *Springer Ingenieur-Tabellen*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2004. ISBN 3-540-64159-9.
- [HOT13] Internetseite: http://www.hotfoil.ch/hfTechnisches_de.asp, 19.03.2013.
- [IDD12] Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren: <http://www.idd-tu-darmstadt.de/>, 2012.
- [ISO13a] ISO Online Browsing Platform: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:472:ed-4:v1:de>, 20.06.2013.

- [ISO13b] ISO Online Browsing Platform: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:12637:-4:ed-1:v1:en:term:2.33>, 20.06.2013.
- [ISO13c] ISO Online Browsing Platform: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:472:ed-4:v1:en:term:2.472>, 20.06.2013.
- [INT13] Internetseite:
<http://www.silkscreenhistory.com/vorlauf/vorlauf6.html>, 19.02.2013.
- [KAM11] A. Kamyshny, J. Steinke, S. Magdassi: *Metal-based Inkjet Inks for Printed Electronics*. In: The Open Applied Physics Journal, 2011, 4, pp. 19-36.
- [KAP86] A. Kapr: Johannes Gutenberg: *Persönlichkeit und Leistung*. Leipzig, 1986. ISBN 3-332-00015-2.
- [KIP00] H. Kipphan: *Handbuch der Printmedien: Technologien und Produktionsverfahren*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Milan, Paris, Singapore, Tokyo, 2000. ISBN 3-540-66941-8.
- [KIE01] P. Kiehl: *Einführung in die DIN-Normen*. 13. Auflage. B. G. Teubner GmbH, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden; Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich, 2001. ISBN 3-519-26301-7.
- [KLE03] W. Kleppmann: *Taschenbuch Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren*. 3., überarbeitete Auflage. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2003. ISBN 3-446-22319-3.
- [KLI13] G. Klink: *Heterointegration Technologies on Plastic Films*. In: Technologieforum „Generative Fertigungsverfahren in der Elektronik“, Oberpfaffenhofen, 2013. <http://www.zve-kurse.de/Berichte.html>, 03.04.2013.
- [KO07] S.H. Ko, H. Pang, C.P. Grigoropoulos: *All-inkjet-printed flexible electronics fabrication on a polymersubstrate*. In: Nanotechnology 18, 2007. 3452002.
- [KOL12] A. Kolew: *Heißprägen von Verbundfolien für mikrofluidische Anwendungen*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2012. ISBN 978-3-86644-888-9.
- [KOL13] Kolbe Coloco: <http://www.kolbe-coloco.de/produkte/warenausstattung/verpackungen.html>, 23.10.2013.
- [KRE13] Kremser GmbH: <http://www.kremser.de/produkte.html>, 29.04.2013.
- [KUE90] G. Kühne: *Bedrucken von Kunststoffen. Werkstoffe, Verfahrenstechnik, Farben, Verpackungsdruck*. Hüthig Verlag, Heidelberg, 1990. ISBN 3-7785-1585-3.
- [KUR12] LEONHARD KURZ Stiftung & Co. KG: <http://www.kurz.de/de/>, 2012.
- [LAC07] N. Lack: *Untersuchung des Einflusses der Prägequalität auf die elektrische Leitfähigkeit geprägter Leiterbahnen*. Diplomarbeit, Hochschule der Medien, Stuttgart, 2007 (unveröffentlicht).

- [LAN11] K. Langeheinecke, P. Jany, G. Thieleke: *Thermodynamik für Ingenieure. Ein Lehr- und Arbeitsbuch für Studium*. 8. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011. ISBN 987-3-8348-1356-5.
- [LEI09] J. M. Leimeister, H. Krcmar: *Gedruckte Polymer-RFID-Transponder. Erste Erfahrungen und Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt PRISMA*. Josev EUL Verlag, Lohmar-Köln, 2009. ISBN 978-3-89936-762-1.
- [LIE97] D. Liebau, I. Heinze und Mitarbeiter: *Industrielle Buchbinderei*. Verlag Beruf + Schule, Itzehoe, 1997. ISBN 3-88013-553-3.
- [LYA12a] A. Lyashenko, L. Salun, E. Dörsam: *Contacting method for printed electronics*. In: Large-area, Organic & Printed Electronics Convention (LOPE-C), Munich, 2012.
- [LYA12b] A. Lyashenko, L. Salun, E. Dörsam: *Hot stamping technology for functional printing*. In: Advances in Printing and Media Technology, Vol. XXXIX, 2012, pp. 69-74.
- [LYA12c] A. Lyashenko, J. Neumann, A. Hakimi Tehrani, E. Dörsam: *Challenges of hot stamping for functional applications*. In: 9th WCPC (Welsh Centre for Printing and Coating) Annual Technical Conference, Swansea, 2013.
- [MAI10] M. Maiwald, C. Werner, V. Zoellmer, M. Busse: *INKtelligent printed strain gauges*. In: Sensors and Actuators: A, Physical 162, Nr. 2, 2010, pp. 198-201.
- [MID13] Forschungsvereinigung Räumliche Elektrische Baugruppen 3-D MID e.V.: <http://www.3d-mid.de/>, 31.05.2013.
- [MOC04] U. Mock: *Über das Benetzungsverhalten polymermodifizierter Grenzflächen*. Dissertation, Alber-Ludwig-Universität Freiburg, Freiburg, 2004.
- [MOE09] A. Moebius, D. Elbick, E.-R. Weidlich, K. Feldmann, F. Schuesler, J. Borris, M. Thomas, A. Zaenker, C.-P. Klages: *Plasma-printing and galvanization hand in hand – a new technology for the cost-efficient manufacture of flexible printed circuits*. In: Electrochimica Acta 54, 2009, pp. 2473-2477.
- [MOL11] F. Molina-Lopez, J. Courbat, D. Briand, N. F. de Rooij: *Inkjet printing of silver on flexible substrates for sensing applications*. In: Proceedings of LOPE-C 2011, Frankfurt, 2011, pp. 278-282.
- [MSA10] Measurement Systems Analysis: *MSA 4*. Fourth Edition, 2010. ISBN 978-1-60-534211-5.
- [NAT13c] National Instruments: *LabVIEW. Erste Schritte mit LabVIEW*. 373427H-0113, Juni 2012. http://www.ni.com/pdf/manuals/373427h_0113.pdf, 02.07.2013.
- [NEN06] J. Nentwig: *Kunststofffolien. Herstellung-Eigenschaften-Anwendung*. 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2006. ISBN-13 978-3-446-40390-1.
- [NIE12] Persönliche Gespräche mit Jens Niemann der Firma LEONHARD KURZ Stiftung & Co. KG, 20.12.2012.

- [OEAI3] Organic and Printed Electronics Association: http://www.o-ea.org/en_GB/members;jsessionid=4F0A0B2C94381D8FD5925F79A1FC60DD, 07.06.2013.
- [PAH07] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, K.-H. Grote: *Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung*. 7. Auflage. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007. ISBN 978-3-540-34060-7.
- [PAT00] Patentanmeldung DE 1993 26 00 A1.
- [PAT03] Patentanmeldung DE 37 11 403 A1.
- [PAT27] Patentanmeldung EP 29 28 27 A1.
- [PAT32] Patentanmeldung US 44 95 232 A.
- [PAT39] Patentanmeldung US 45 17 739 A.
- [PAT40] Patentanmeldung WO 98 377 40 A1.
- [PAT51] Patentanmeldung EP 04 23 651 A1.
- [PAT75] Patentanmeldung DE 1992 71 75 A1.
- [PAT77] Patentanmeldung US 36 78 577 A.
- [PAT98] Patentanmeldung EP 2003 698 A2.
- [PAT99] Patentanmeldung DE 201 15 299 U1.
- [POL09] W. Polifke, J. Kopitz: *Wärmeübertragung. Grundlagen, analytische und numerische Methoden*. 2. Auflage. Pearson Studium Verlag, München, 2009. ISBN 978-3-8273-7349-6.
- [RAU11a] J. Rausch, L. Salun, S. Griesheimer, M. Ibis, R. Werthschützky: *Printed resistive strain sensors for monitoring of lightweight structures*. In: Smart Structures/ NDE. Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks and Systems 2011, San Diego. Proceedings of SPIE, 2011.
- [RAU11b] J. Rausch, L. Salun, S. Griesheimer, M. Ibis, R. Werthschützky: *Printed piezoresistive strain sensors for monitoring of lightweight structures*. In: SENSOR & TEST Conference, Nürnberg, 2011.
- [RAU12] J. Rausch: *Entwicklung und Anwendung miniaturisierter piezoresistiver Dehnungsmesselemente*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Verlag Dr. Hut, München, 2012. ISBN 978-3-8439-0553-4.
- [REB04] Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3D-MID e.V.: *3D-MID Technologie. Räumliche Elektronische Baugruppen. Herstellungsverfahren, Gebrauchsanforderungen, Materialkennwerte*. Carl Hanser Verlag, München, 2004. ISBN 3-446-22720-2.
- [RIC11] H. Richter, J. Franke, D. Drummer: *Heißprägen von Kunststofffolien zum Aufbau von Low Cost Flexschaltungen*. Abschlussbericht AiF, Stuttgart, Nürnberg, Erlangen, 2011.

- http://www.imat.hsg-imit.de/fileadmin/hsg-imat/Kompetenzen___Arbeitsgebiete/MID-Technologie/Heisspraeger-MID-Technik/Abschlussbericht_HP-KSF.pdf, 24.06.2013.
- [ROS13] T. Rossner, A. Lyashenko: *Possibility for Electrical Contacting of Printed Layers*. Technologieforum „Generative Fertigungsverfahren in der Elektronik“, Oberpfaffenhofen, 2013. <http://www.zve-kurse.de/Berichte.html>, 15.07.2013.
- [SCH03] G. Schmitz und 55 Mitautoren: *Mechatronik im Automobil II. Aktuelle Trends in der Systementwicklung für Automobile*. Expert-Verlag, Renningen, 2003. ISBN 3-8169-2139-6.
- [SIE10] K. Siebertz, D. van Bebber, T. Hochkirchen: *Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE)*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-05492-1.
- [STA13] S. Stahl: *Einfluss der Druckform und der Fluidviskosität auf die Schichtdicke von im Tiefdruck hergestellten Funktionsschichten und deren Charakterisierung*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2013. <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/3529/>.
- [STE07] P. Stephan, K. Schaber: *Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen*. 17. Auflage. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007. ISBN 978-3-540-70813-1.
- [SOM09] T. Someya, T. Sekitani: *Printed skin-like large area flexible sensors and actuators*. In: Proceedings of Eurosensors XXIII Conference, 2009.
- [TES05] H. Teschner: *Druck & Medientechnik*. 12. Auflage. Fachschriften-Verlag, Fellbach, 2005. ISBN 3-931436-88-8.
- [UNB83] R. Unbehauen: *Systemtheorie. Eine Darstellung für Ingenieure*. 4., verb. Auflage. R. Oldenbourg Verlag GmbH, Oldenbourg, 1983. ISBN 3-486-38454-6.
- [UNB02] R. Unbehauen: *Systemtheorie 1. Allgemeine Grundlagen, Signale und lineare Systeme im Zeit- und Frequenzbereich*. 8., korr. Auflage. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 2002. ISBN 3-486-25999-7.
- [VAN58] L. J. Van der Pauw: *A Method of Measuring the Resistivity and Hall Coefficient on Lamellae of Arbitrary Shape*. Philips Tech., Rev. 20, 1958.
- [VDA10] Verband der Automobilindustrie e.V.: *VDA Band 5 Prüfprozesseignung*. 2. Auflage, Frankfurt, 2010. ISSN 0943-9412.
- [VDI95] H. M. Hiersig: *VDI-Lexikon. Maschinenbau*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995. ISBN 3-540-62133-4.
- [VDI06] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Wärmeatlas*. 10. Auflage. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006. ISBN 978-3-540-25503-1.

- [VDI13] VDI Verlag GmbH:
<http://www.ingenieur.de/Branchen/Elektro-Elektronikindustrie/Gedruckte-Elektronik-kommt-ueber-Systemintegration-Anwender>, 04.12.2013.
- [VEN00] A. Venzke: *Johannes Gutenberg – Der Erfinder des Buchdrucks und seine Zeit*. Piper-Verlag, München 2000. ISBN 3-492-22921-2.
- [WIL12] J. Willmann: *Innovationen in der druckbaren Elektronik: von der Idee zur Produktion. Eine technische und wirtschaftliche Analyse*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2012. <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/3644/>.
- [WOR09] M. Worgull: *Hot Embossing. Theory and Technology of Microreplication*. Elsevier Inc., 2009. ISBN: 978-0-8155-1579-1.
- [WU11] J. Wu, D. Day, M. Gu: *Polymeric optofluidic Fabry-Perot sensor by direct laser machining and hot embossing*. In: *Applied Optics*, Vol. 50, 2011, pp. 1843-1849.
- [ZAH90] G. Zahn: *Grundwissen für Buchbinder*. Verlag Beruf + Schule, Itzehoe, 1990.
- [ZWE06] K. Zwerenz: *Statistik. Datenanalyse mit EXCEL und SPSS*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 2006. ISBN 978-3-486-58156-0.

Produktinformationen

- [ANS13] ANSYS, Inc.:
<http://www.ansys.com/Products/Workflow+Technology/ANSYS+Workbench+Platform>, 13.08.2013.
- [CRC14] CRC Industries UK Ltd.:
<http://www.crcind.com/csp/web/ProdDisp.csp?lng=3&idx=3675410&country=GB&product=SOL%20HEAT%20SINK%20COMPOUND%20%20SIL&brand=SERVISOL>, 07.01.2014.
- [FUJ13] FUJIFILM Europa GmbH:
<http://www.fujifilm.eu/de/produkte/industrieprodukte/prescale/>, 06.07.2013.
- [HAM13] HAMEG Instruments: <http://www.hameg.com/1.502.0.html>, 14.08.2013.
- [JEO13] JEOL USA, Inc.:
<http://www.jeolusa.com/HOME/Landing/JSM6610LV/tabid/741/Default.aspx>, 06.12.2013.
- [KBA13] KBA-Metronic GmbH:
<http://www.kba-metronic.com/kennzeichnungssysteme/laserkennzeichnung/product/lasersystem-f-9000/detail/>, 15.07.2013.
- [KEL13] Keller Ihne & Tesch KG:
<http://www.elektrowaermetechnik.de/cms/index.php/technische-daten.381.html>, 11.06.2013.
- [KIS13] Kistler Instrumente GmbH: <http://www.kistler.com/de/de/product/strain/9232A>, 11.06.2013.
- [KUR08] LEONHARD KURZ Stiftung & Co. KG: *Allgemeine Produktinformation. COLORIT 800*. KURZ, 05.2008.
- [KUR10] LEONHARD KURZ Stiftung & Co. KG: *Allgemeine Produktinformation. COLORIT 900*. KURZ, 06.2010.
- [KUR11] LEONHARD KURZ Stiftung & Co. KG: *Allgemeine Produktinformation. LUXOR/ALUFIN*. KURZ, 09.2011.

- [LEI13] Leica Microsystems:
<http://www.leica-microsystems.com/de/produkte/lichtmikroskope/industrie-materialanalyse/aufrechte-mikroskope/details/product/leica-dm4000-m/>, 19.02.2013.
- [MIT13a] Mitutoyo Deutschland GmbH: <http://www2.mitutoyo.de/de/mitutoyo-sn/home/index.html>, 01.07.2013.
- [MIT13b] Mitsubishi Polyester Film GmbH:
<http://www.m-petfilm.com/Europe/beschichtete%20Folie.htm>, 11.06.2013.
- [NAG14] NAGY Messsysteme GmbH:
http://www.nagy-instruments.de/ohm_sq___od.html, 06.01.2014.
- [NAT13a] National Instruments: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371379a.pdf>, 14.06.2013.
- [NAT13b] National Instruments:
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/de/nid/14873>, 04.11.2013.
- [SEN13] Sensofar-Tech, S. L.:
http://www.sensofar.com/sensofar/pdf/Brochure_Neox.pdf, 20.02.2013.
- [SIE13] Siemens PLM Software, NX:
http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/nx/, 25.08.2013.
- [TES13] Testo AG:
<http://www.testo.de/produkte/produktdetailseite.jsp?productNo=0560%207351>, 06.11.2013.
- [TMH13] Temperatur Messelemente Hettstedt GmbH:
<http://www.temperaturmesstechnik.de/de/produkte/pt100-pt1000-sensoren/mantelwiderstandsthermometer-pt100-pt1000.html>, 19.02.2013.

Eigene Veröffentlichungen

1. Lyashenko, Alexandra; Sauer, Hans Martin; Doersam, Edgar: *Research of applicability of the hot stamping technology for printed electronics*. 2nd Winter School of Organic Electronics, Heidelberg, Germany, 2012.
2. Salun, Larisa; Lyashenko, Alexandra; Rausch, Jacqueline; Doersam, Edgar: *Verfahren zum Kontaktieren einer gedruckten Schaltung und gedruckte Schaltung*. Patentanmeldung DE 102012105334.0, 2012.
3. Lyashenko, Alexandra; Salun, Larisa; Doersam, Edgar: *Contacting method for printed electronics*. Large-area, Organic & Printed Electronics Convention (LOPE-C), Munich, Germany, 2012.
4. Salun, Larisa; Rausch, Jacqueline; Lyashenko, Alexandra; Doersam, Edgar: *Electrical properties of high-resolution structures according to effects of the printing process*. 5th International Symposium on Flexible Organic Electronics (ISFOE12), Thessaloniki, Greece, 2012.
5. Lyashenko, Alexandra; Salun, Larisa; Doersam, Edgar: *Hot Stamping Technology for Functional Printing*. 39th International Research Conference of iarigai, Ljubljana, Slovenia, 2012.
6. Rossner, Tim; Lyashenko, Alexandra: *Possibility for Electrical Contacting of Printed Layers*. Technologieforum "Generative Fertigungsverfahren in der Elektronik", Oberpfaffenhofen, Germany, 2013.
7. Lyashenko, Alexandra; Doersam, Edgar: *Functional Hot Stamping*. Advancing Print & Coatings Group (APG), Swansea, Wales, United Kingdom, 2013.
8. Rossner, Tim; Lyashenko, Alexandra; Doersam, Edgar; Sarwar, Reza; Werthschuetzky, Roland: *Hot Stamped Conductors on Nano-Micro Wires Made by Electroplating for Medical Sensors and Micro-Implants*. SENSOR & TEST Conference Nürnberg, Nürnberg, Germany, 2013.
9. Lyashenko, Alexandra; Neumann, Jann; Hakimi Tehrani, Ardeshir; Doersam, Edgar: *Challenges of hot stamping technology for functional applications*. 9th WCPC (Welsh Centre for Printing and Coating) Annual Technical Conference, Swansea, Wales, United Kingdom, 2013.
10. Dimitrov, Martin; Pelz, Peter; Lyashenko, Alexandra; Hakimi Tehrani, Ardeshir; Dörsam, Edgar: *Measurement System by Printed Thin Pressure Sensor Array*. The 9th International Fluid Power Conference, 9. IFK, Aachen, Germany, 2014.

Anhang 1. Zeichnung der Heizblöcke

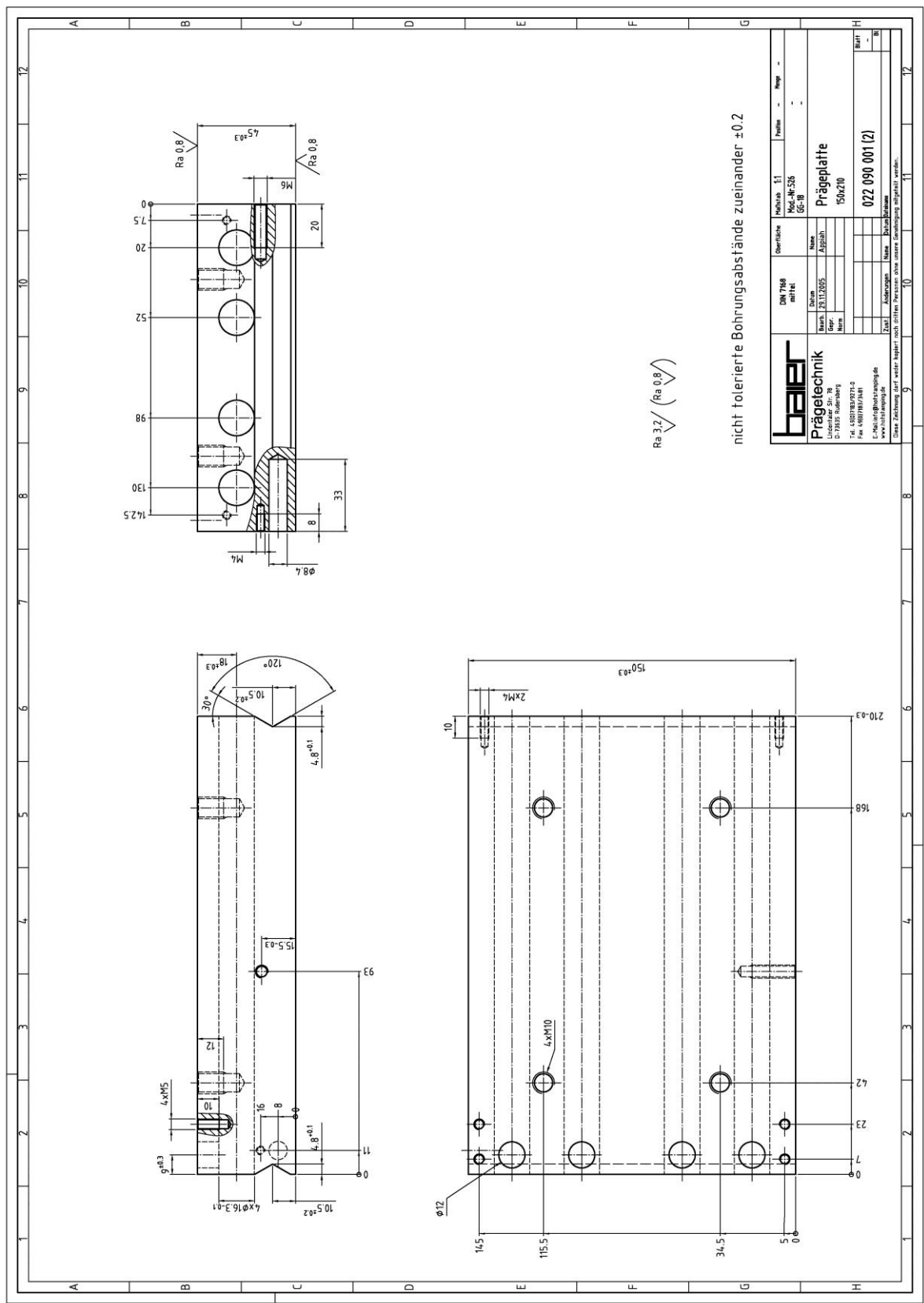


Abb. A1.1: Zeichnung des Heizblocks im Format DIN A5 der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 der Firma Baier GmbH mit den Positionen der vier Heizpatronen. Bildquelle [BAI12].

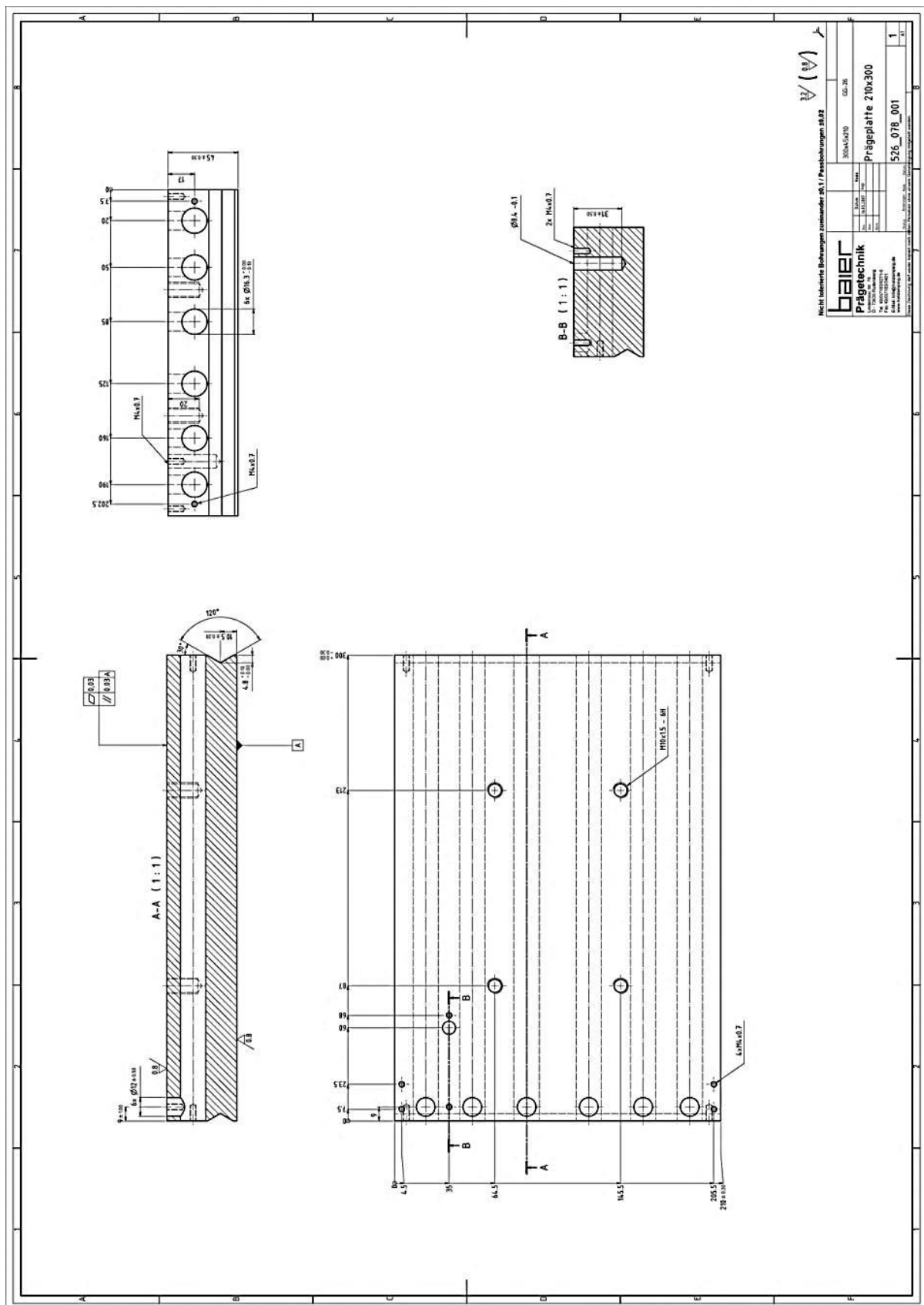


Abb. A1.2: Zeichnung des Heizblocks im Format DIN A4 der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 der Firma Baier GmbH mit den Positionen der sechs Heizpatronen. Bildquelle [BAI12].

Anhang 2. Spezifikation der Heizpatronen

Tabelle A2.1: Spezifikation der Heizpatronen des Typs PDE der Firma Keller Ihne & Tesch KG [KEL13].

<i>Technische Daten</i>	<i>Typ PDE</i>
Mantelmaterial	Edelstahl 1.4541 oder 1.4301
Einsatztemperatur	500 °C max. am Patronenmantel
Leistungsdichte	4-10 W/cm ² max.
Betriebsspannung	230 Volt
Durchmessertoleranz	0,0-0,1 mm
Bohrungstoleranz	ISO-Toleranz H11
Längentoleranz	± 1,5 %, min. ± 2 mm Gesamtlänge = Mantellänge mit keramischen Anschlusskopf (5-7 mm)
Standardanschluss	nach Kundenwunsch Lagerware: 1.000 mm glasseidenisolierte Nickellitze temperaturbeständig bis max. 250 °C
Unbeheizte Zonen	Anschlussseite: 10-20 mm Bodenseite: 5-10 mm
Hochspannungsfestigkeit	bis einschließlich Ø 8 mm = 1.000 Volt AC > Ø 8 mm = 1.300 Volt AC
Isolationswiderstand	kalt ≥ 5 MOhm bei 500 Volt DC
Leistungstoleranz	± 10 %
Ableitstrom (kalt)	≤ 0,5 mA bei 253 Volt DC

Anhang 3. Messwerte der Linienstärken auf den Prägewerkzeugen

Tabelle A3.1: Die auf dem Messingprägewerkzeug gravierten Linienstärken L_{pw} (gemittelt aus drei Messwerten am Leica-Mikroskop) im Vergleich mit den vorgegebenen Linienstärken L_{Layout} auf dem Layout (siehe Abb. 4.1 auf Seite 43). Die Standardabweichung ist jeweils auf drei Messwerte der gemessenen Linienstärken L_{pw} bezogen.

#	$L_{Layout} [\mu m]$	$L_{pw} (Messing) [\mu m]$	Standardabweichung $[\mu m]$
Linie 1	10	119,59	1,95
Linie 2	20	123,11	0,91
Linie 3	30	123,50	3,00
Linie 4	40	128,90	4,27
Linie 5	50	135,75	2,25
Linie 6	60	141,85	5,09
Linie 7	70	144,45	0,60
Linie 8	80	168,98	1,79
Linie 9	90	167,55	4,27
Linie 10	100	173,48	1,60
Linie 11	200	271,42	1,61
Linie 12	300	377,75	1,04
Linie 13	400	472,51	1,60
Linie 14	500	578,84	0,60
Linie 15	600	689,17	5,82
Linie 16	700	786,88	0,75
Linie 17	800	888,91	1,50
Linie 18	900	997,83	3,91
Linie 19	1000	1105,46	11,28

Tabelle A3.2: Die auf dem Stahlprägewerkzeug gravierten Linienstärken L_{pw} (gemittelt aus drei Messwerten am Leica-Mikroskop) im Vergleich mit den vorgegebenen Linienstärken L_{Layout} auf dem Layout (siehe Abb. 4.1 auf Seite 43). Die Standardabweichung ist jeweils auf drei Messwerte der gemessenen Linienstärken L_{pw} bezogen.

#	$L_{Layout} [\mu m]$	$L_{pw} (Stahl) [\mu m]$	Standardabweichung $[\mu m]$
Linie 1	10	61,63	3,05
Linie 2	20	69,33	6,38
Linie 3	30	69,90	0,51
Linie 4	40	76,24	1,08
Linie 5	50	94,91	0,79
Linie 6	60	91,32	2,44
Linie 7	70	104,17	3,33
Linie 8	80	117,05	2,39
Linie 9	90	121,24	3,04
Linie 10	100	124,64	3,41

#	$L_{Layout} [\mu m]$	$L_{pw}(Stahl) [\mu m]$	Standardabweichung $[\mu m]$
Linie 11	200	228,21	4,22
Linie 12	300	346,02	12,43
Linie 13	400	433,17	8,77
Linie 14	500	526,68	2,88
Linie 15	600	632,19	4,16
Linie 16	700	725,72	3,62
Linie 17	800	825,01	0,83
Linie 18	900	926,85	8,80
Linie 19	1000	1033,89	1,90

Anhang 4. Spezifikation der PET-Folie

Tabelle A4.1: Spezifikation der PET-Folie Hostaphan GN 4600 der Firma Mitsubishi Polyester Film GmbH [MIT13b].

Eigenschaften	Dicke µm	Einheiten	Werte		Prüfmethoden	Prüfbedingungen
			längs	quer		
MECHANISCH						
Zugfestigkeit	50-125 175-250	N/mm²	180 175	230 220	ISO 527-1 und ISO 527-3 Probekörper Typ 2	Prüfgeschw.100%/min.; 23 °C, 50 % r.F.
Reißdehnung	50-125 175-250	%	190 175	130 120	ISO 527-1 und ISO 527-3 Probekörper Typ 2	Prüfgeschw.100%/min.; 23 °C, 50 % r.F.
Elastizitätsmodul	50-125 175-250	N/mm²	4100 3900	4900 4600	ISO 527-1 und ISO 527-3 Probekörper Typ 2	Prüfgeschw. 1 %/min.; 23 °C, 50 % r.F.
Zugspannung zur Erzeugung einer Dehnung von 5% (F5-Wert)	50-125 175-250	N/mm²	105 110	105 110	ISO 527-1 und ISO 527-3 Probekörper Typ 2	Prüfgeschw.100%/min.; 23 °C, 50 % r.F.
THERMISCH						
Schrumpf	50-175 250	%	1,0 1,0	0,1 0,9	DIN 40634	150°C, 15 min.
OPTISCH						
Transparenz	50-250	%	91		ASTM-D 1003-61 Meth- ode A	-
Trübung (einseitige Beschichtung)	50, 75 96, 100 125 175 250	%	0,5 0,6 0,6 1,1 1,5		ASTM-D 1003-61 Meth- ode A	Erweiterter Meßwinkel
Gelbzahl	50, 75 96, 100 125 175 250	-	1,5 2,0 2,5 2,8 3,0		ASTM-D 1925-63T	-
OBERFLÄCHE						
Rauheit Ra Wert	50-250	nm	10		DIN 4768	Cut off 0,25 mm
PHYSIKALISCH/CHEMISCH						
Dichte	50-250	g/cm³	1,4		ASTM-D 1505-68 Meth- ode C	23°C

Anhang 5. Spezifikation der Thermoelemente

Tabelle A5.1: Spezifikation der Thermoelemente des Typs K der Firma Temperatur Messelemente Hettstedt GmbH [TMH13].

<i>Bezeichnung</i>	<i>Daten</i>
021.1117.4123	Mantelthermoelemente D=0,50 mm NiCr-Ni (K), Klasse 1, isoliert Mantelstoff Inconel KÜH mit 2-komponenter-Vergussmasse (300 °C) Mit angeschl. THL, Litze, 2×0,22 mm ² Isolation: Teflon/Draht/Teflon Nennlänge: 90 mm Kabellänge: 4.000 mm
021.1117.4123	Mantelthermoelemente D=0,50 mm NiCr-Ni (K), Klasse 1, isoliert Mantelstoff Inconel KÜH mit 2-komponenter-Vergussmasse (300 °C) Mit angeschl. THL, Litze, 2×0,22 mm ² Isolation: Teflon/Draht/Teflon Nennlänge: 170 mm Kabellänge: 4.000 mm

Anhang 6. Zeichnungen zusätzlicher Teile beim Temperaturmessaufbau

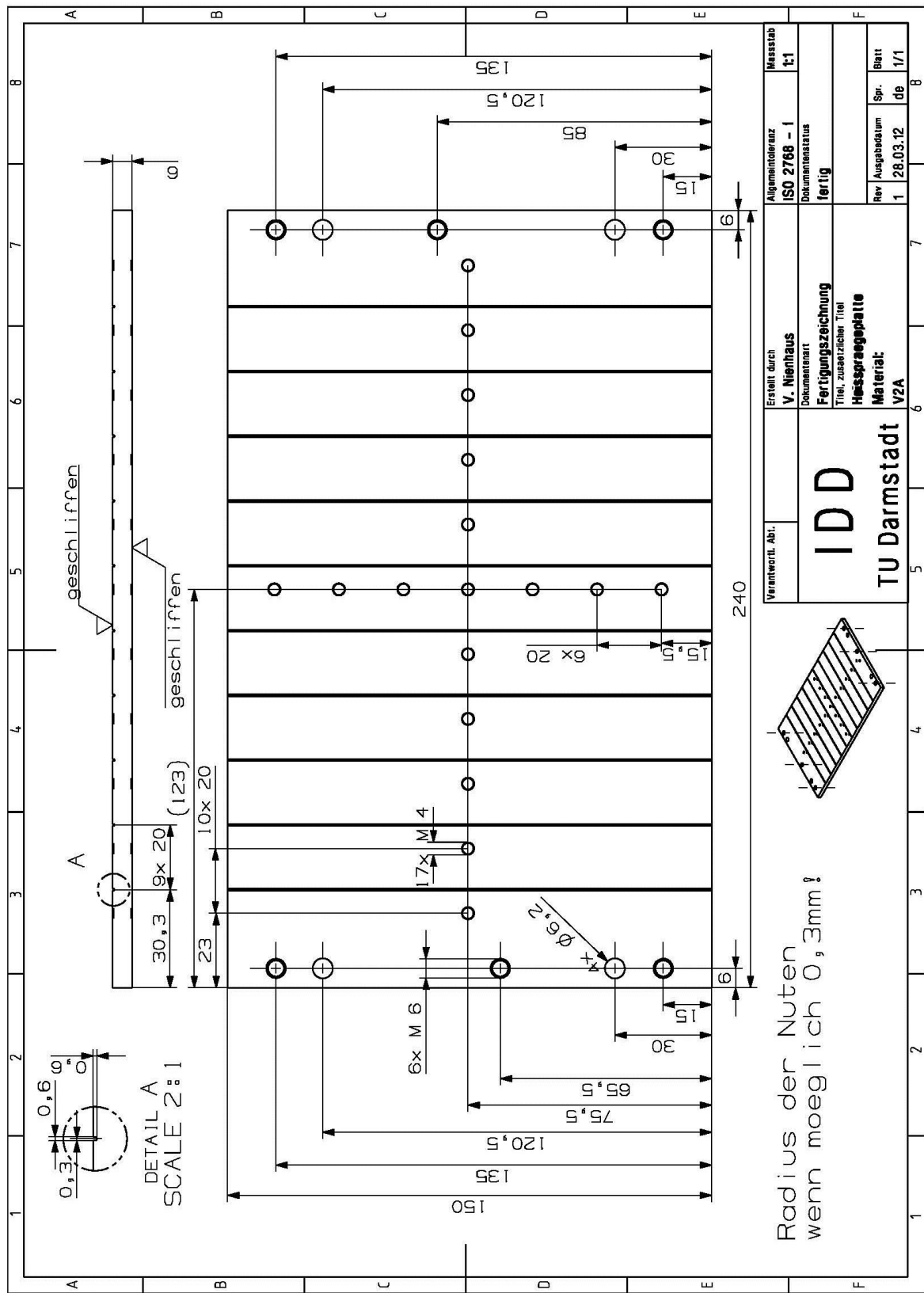


Abb. A6.1: Zeichnung der Halterplatte im Format DIN A5 der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 mit zehn Nuten für die Positionierung der Thermoelemente.

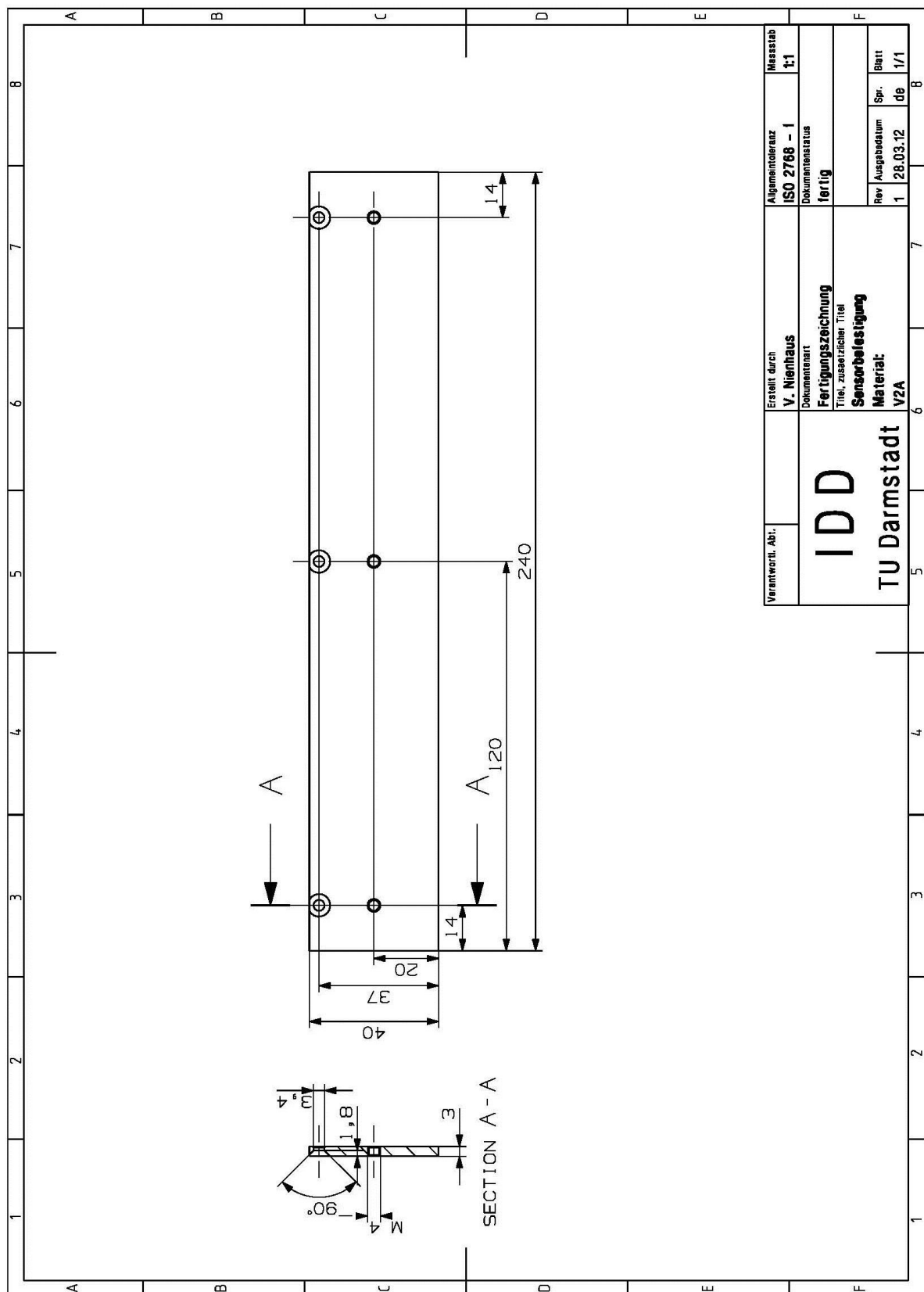


Abb. A6.2: Zeichnung der Halterung für die Thermoelemente beim Temperaturmessaufbau an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 der Firma Baier. Teil 1: Befestigungsplatte.

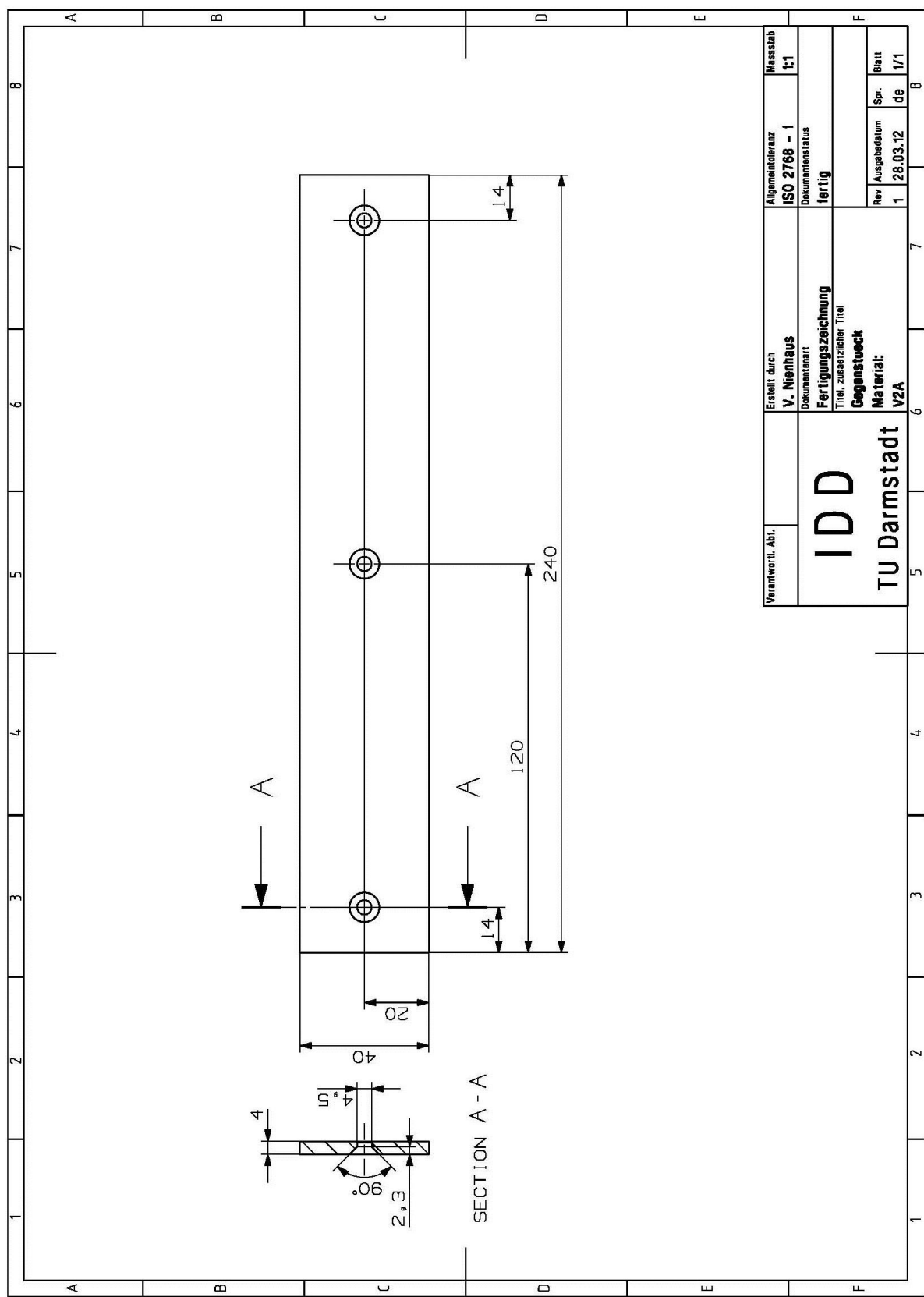


Abb. A6.3: Zeichnung der Halterung für die Thermoelemente beim Temperaturmessaufbau an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 der Firma Baier. Teil 2: Gegenstück.

Anhang 7. Skizze der Funktionsweise des LabVIEW-Programms

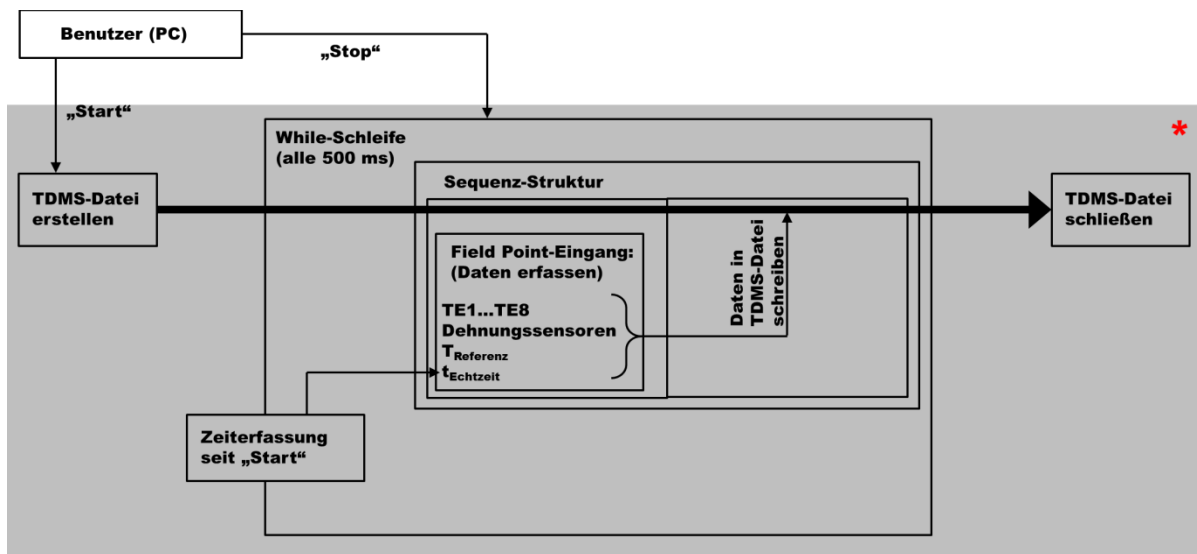


Abb. A7.1: Skizze der Funktionsweise des LabVIEW-Programms für den Temperaturmessaufbau an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6. In einer TDMS-Datei werden alle 500 ms die Temperaturmesswerte von acht Thermoelementen TE1 bis TE8, die Temperatur des im Field-Point-Gerät eingebauten Referenz-Thermometers $T_{Referenz}$, Messwerte der Dehnungssensoren und die aktuelle Zeit $t_{Echtzeit}$ gespeichert.

Anhang 8. Temperaturmessungen beim Temperaturmessaufbau „Aufheizen“

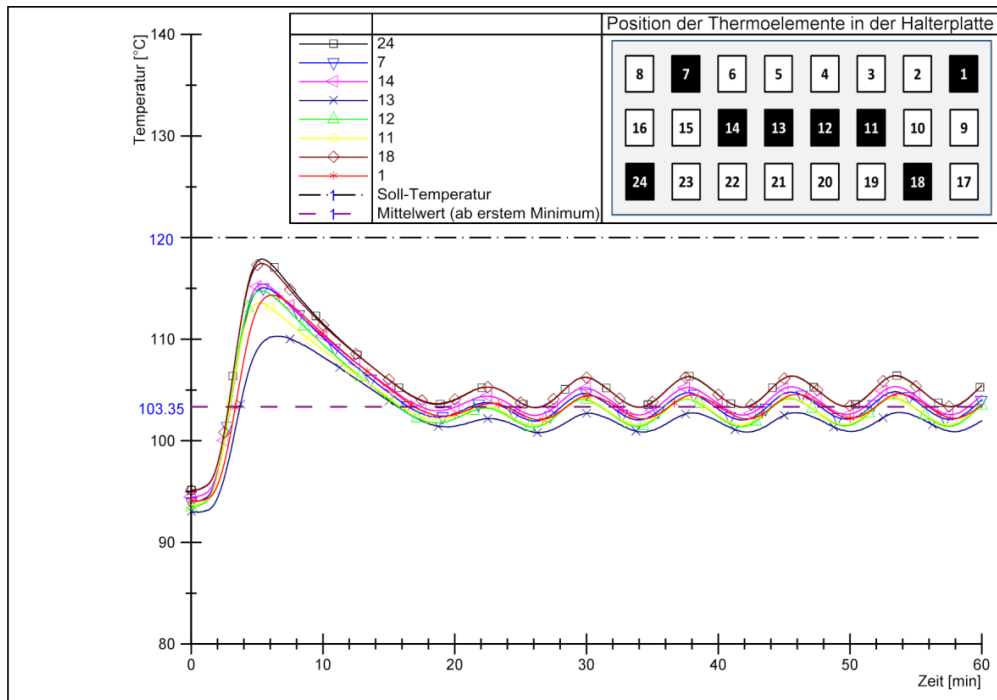


Abb. A8.1: Temperatur in der Halterplatte mit dem eingesetzten **Messingprägewerkzeug** beim Nachheizen der Prägeeinheit von 110 °C auf 120 °C der Soll-Temperatur. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung. Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt zwischen 29,5 °C und 30 °C.

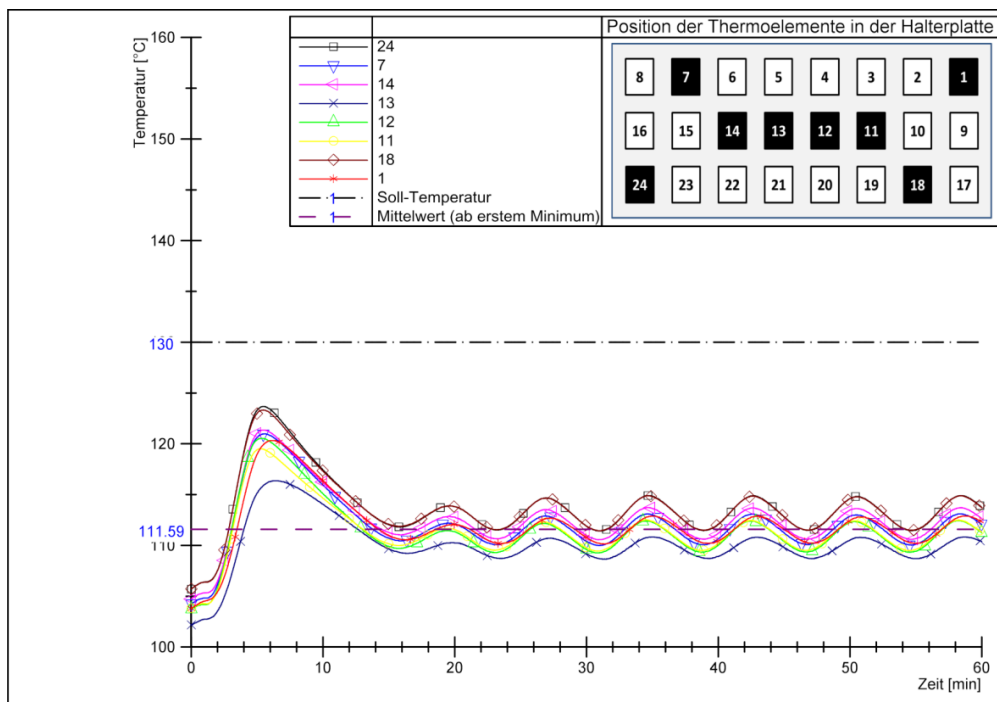


Abb. A8.2: Temperatur in der Halterplatte mit dem eingesetzten **Messingprägewerkzeug** beim Nachheizen der Prägeeinheit von 120 °C auf 130 °C der Soll-Temperatur. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung. Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt zwischen 30 °C und 30,3 °C.

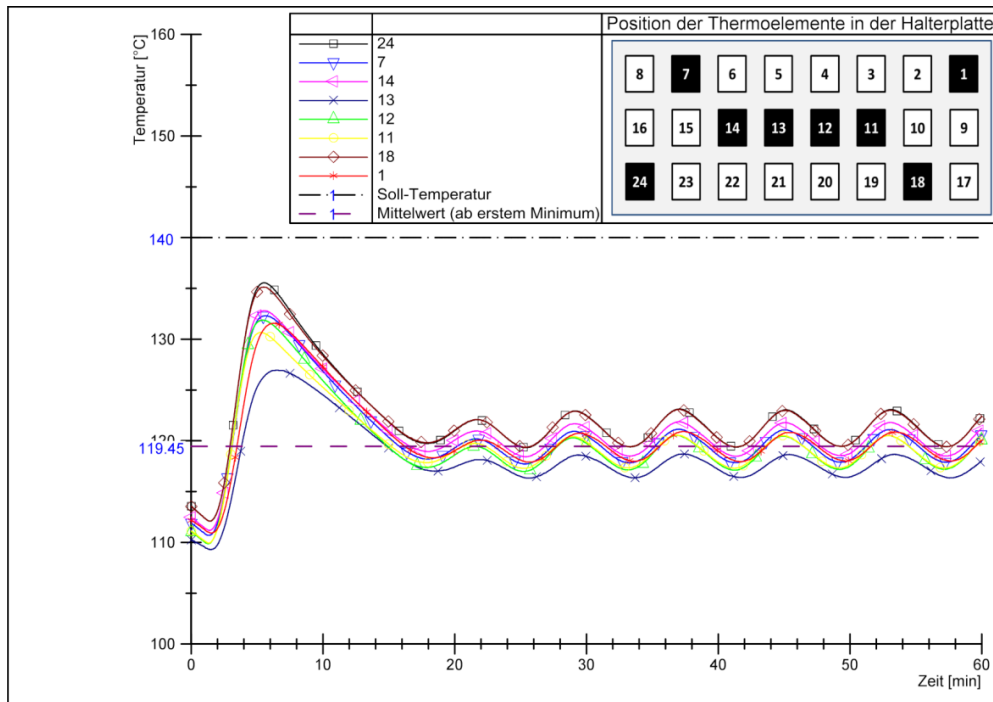


Abb. A8.3: Temperatur in der Halterplatte mit dem eingesetzten **Messingprägewerkzeug** beim Nachheizen der Prägeeinheit von 130 °C auf 140 °C der Soll-Temperatur. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung. Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt zwischen 30,3 °C und 30,6 °C.

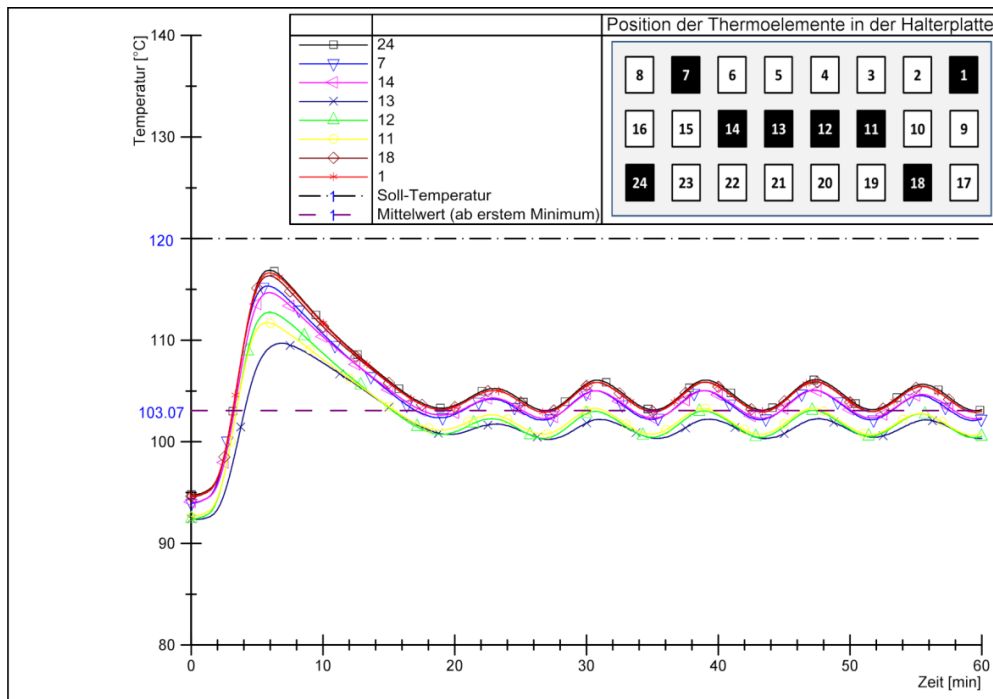


Abb. A8.4: Temperatur in der Halterplatte mit dem eingesetzten **Stahlprägewerkzeug** beim Nachheizen der Prägeeinheit von 110 °C auf 120 °C der Soll-Temperatur. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung. Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt zwischen 27,2 °C und 27,6 °C.

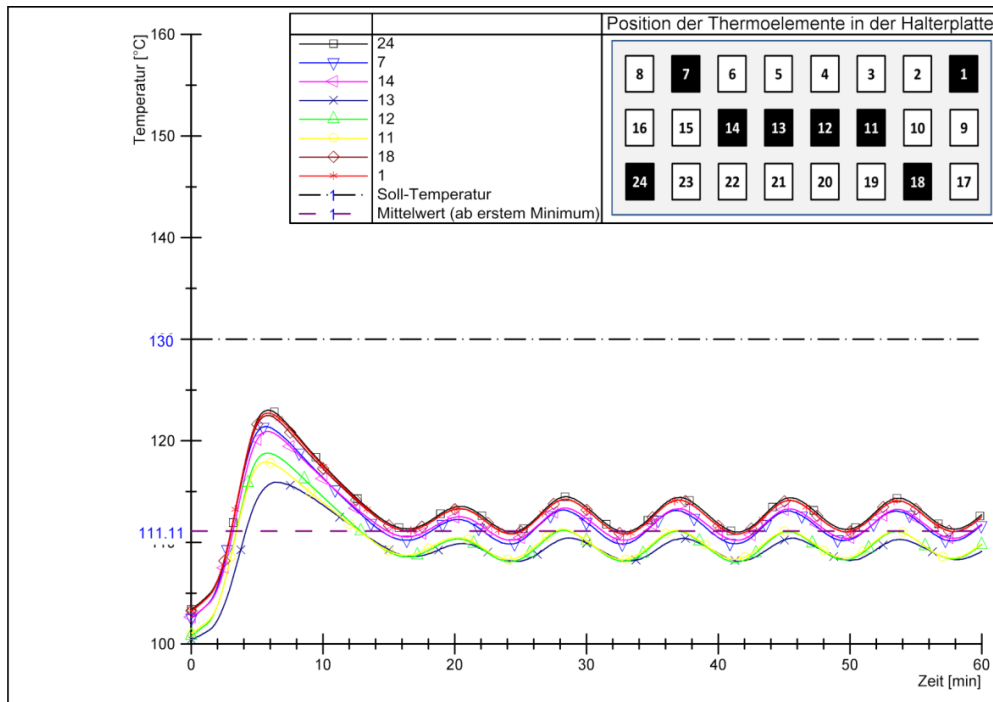


Abb. A8.5: Temperatur in der Halterplatte mit dem eingesetzten **Stahlprägewerkzeug** beim Nachheizen der Prägeeinheit von 120 °C auf 130 °C der Soll-Temperatur. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung. Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt zwischen 27,6 °C und 27,9 °C.

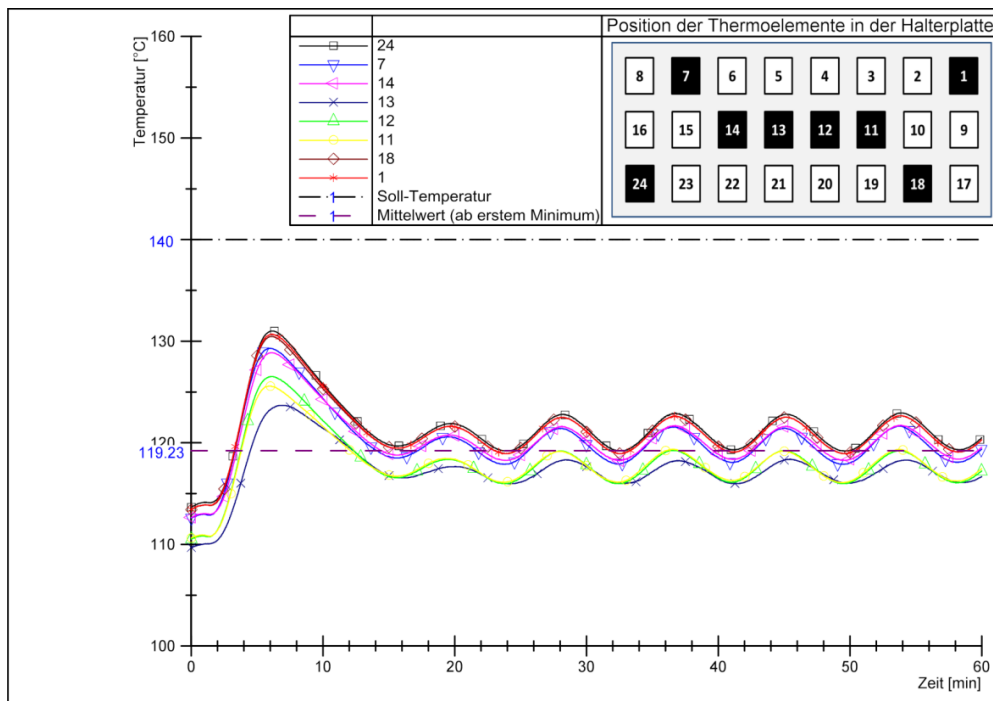


Abb. A8.6: Temperatur in der Halterplatte mit dem eingesetzten **Stahlprägewerkzeug** beim Nachheizen der Prägeeinheit von 130 °C auf 140 °C der Soll-Temperatur. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung. Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt zwischen 27,9 °C und 28,1 °C.

Anhang 9A. Temperaturmessungen beim Temperaturmessaufbau „Prägefoliendruckvorgang“ für die Prägefolie Luxor GTS Premium 355

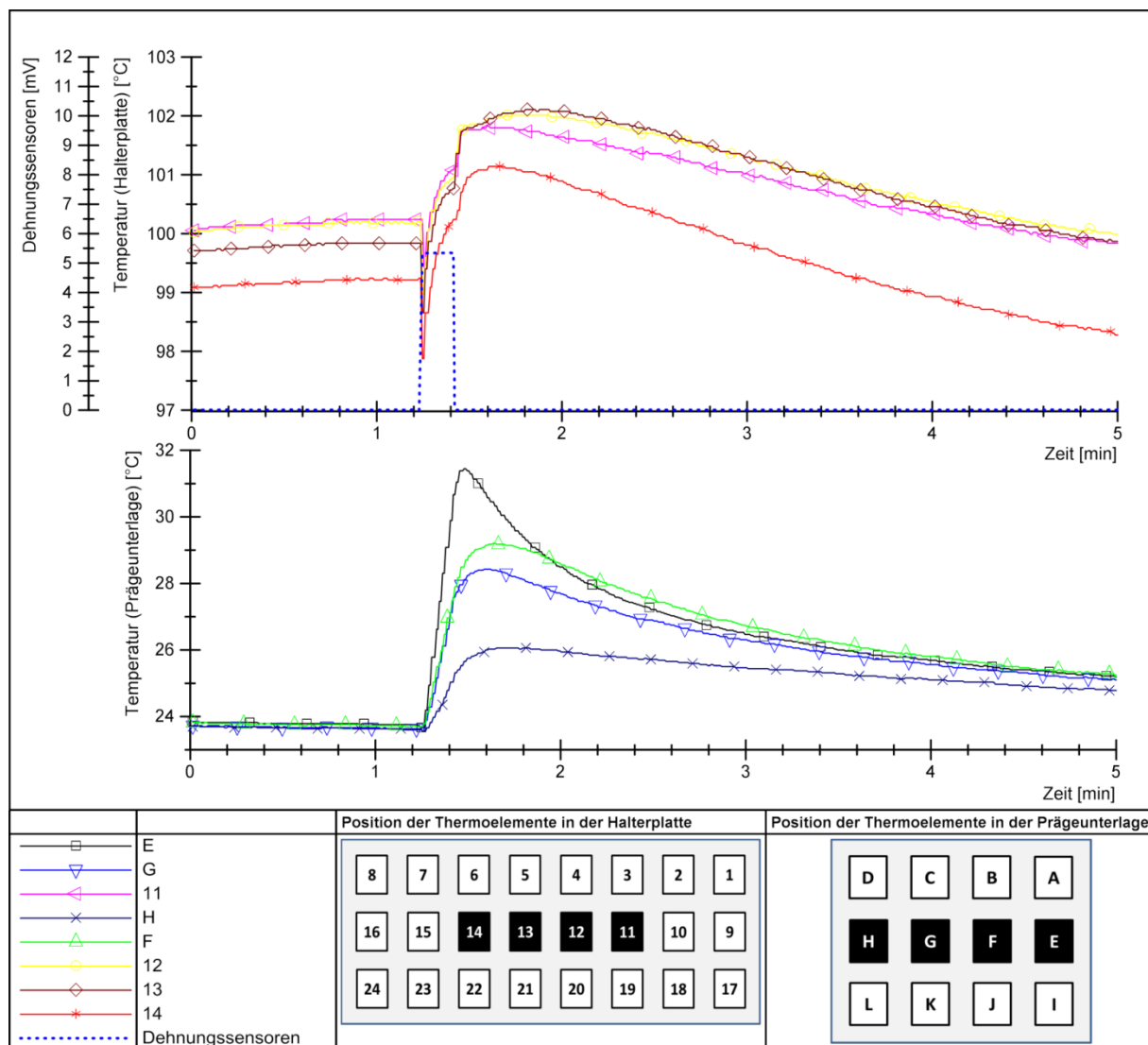


Abb. A9A.1: Temperatur in der Halterplatte und in der Prägeunterlage beim Prägefoliendruckvorgang mit der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** und dem **Messingprägewerkzeug**: Soll-Temperatur 120 °C, Anpressdruck 40 kN und Prägezeit 10 Sekunde. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung, in der Prägeunterlage – Abb. 5.15 (siehe Seite 74). Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt zwischen 25,1 °C und 25,3 °C.

Anhang 9A. Temperaturmessungen beim Temperaturmessaufbau „Prägefoliendruckvorgang“ für die Prägefolie Luxor GTS Premium 355

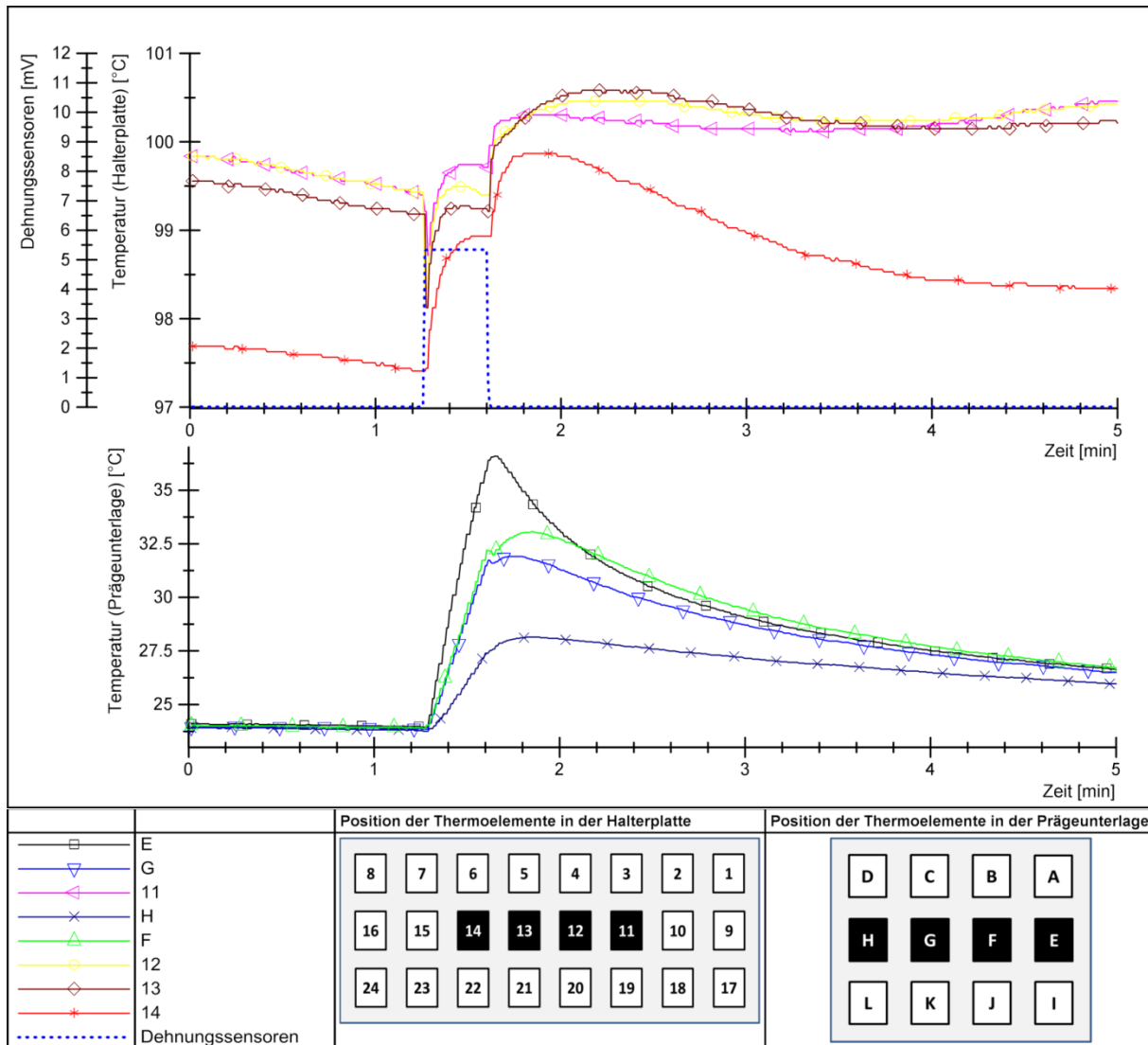


Abb. A9A.2: Temperatur in der Halterplatte und in der Prägeunterlage beim Prägefoliendruckvorgang mit der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** und dem **Messingprägewerkzeug**: Soll-Temperatur 120 °C, Anpressdruck 40 kN und Prägezeit 20 Sekunden. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung, in der Prägeunterlage – Abb. 5.15 (siehe Seite 74). Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt zwischen 25,5 °C und 25,6 °C.

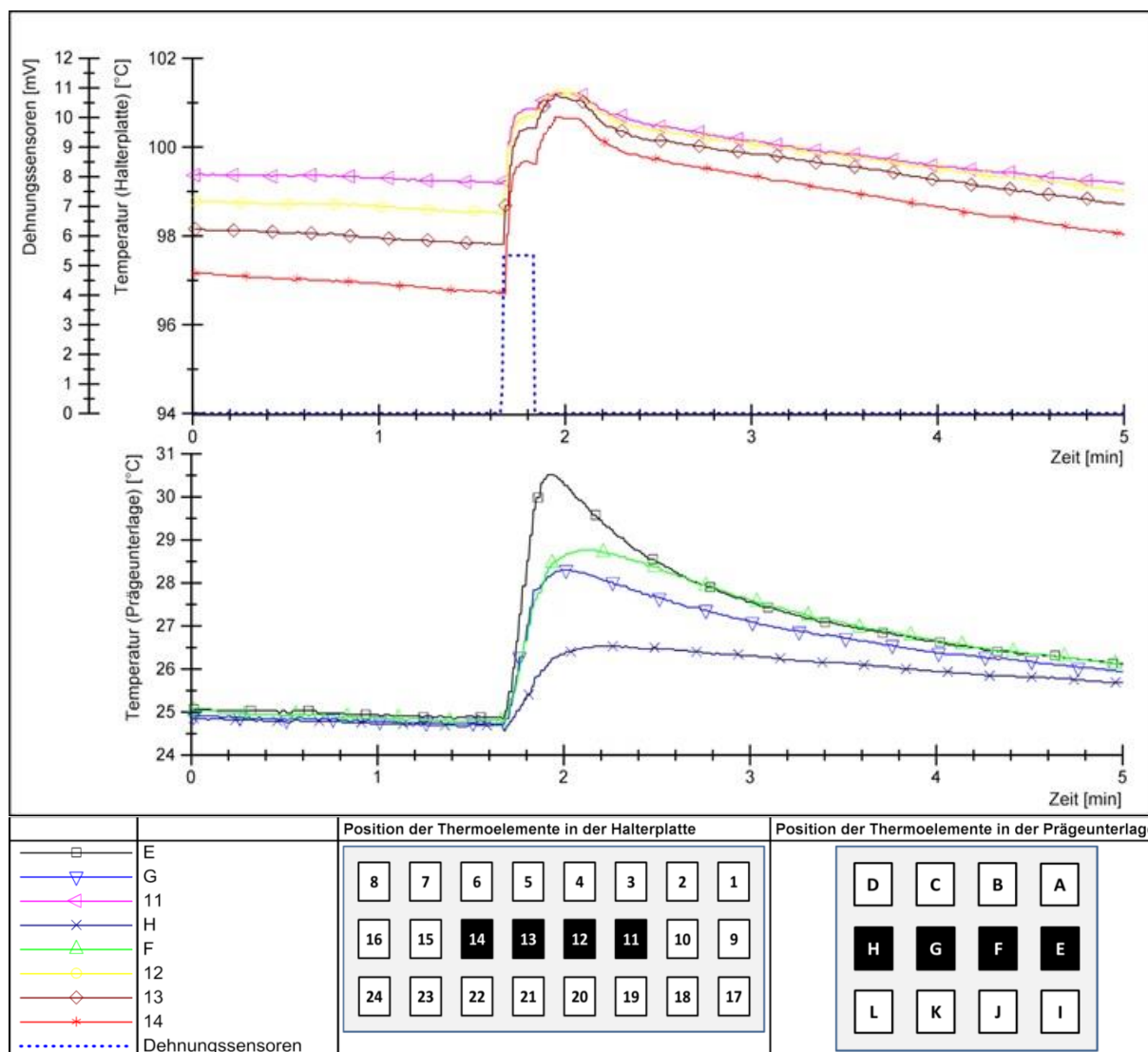


Abb. A9A.3: Temperatur in der Halterplatte und in der Prägeunterlage beim Prägefoliendruckvorgang mit der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** und dem **Stahlprägewerkzeug**: Soll-Temperatur 120 °C, Anpressdruck 40 kN und Prägezeit 10 Sekunden. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung, in der Prägeunterlage – Abb. 5.15 (siehe Seite 74). Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt zwischen 26,4 °C und 26,5 °C.

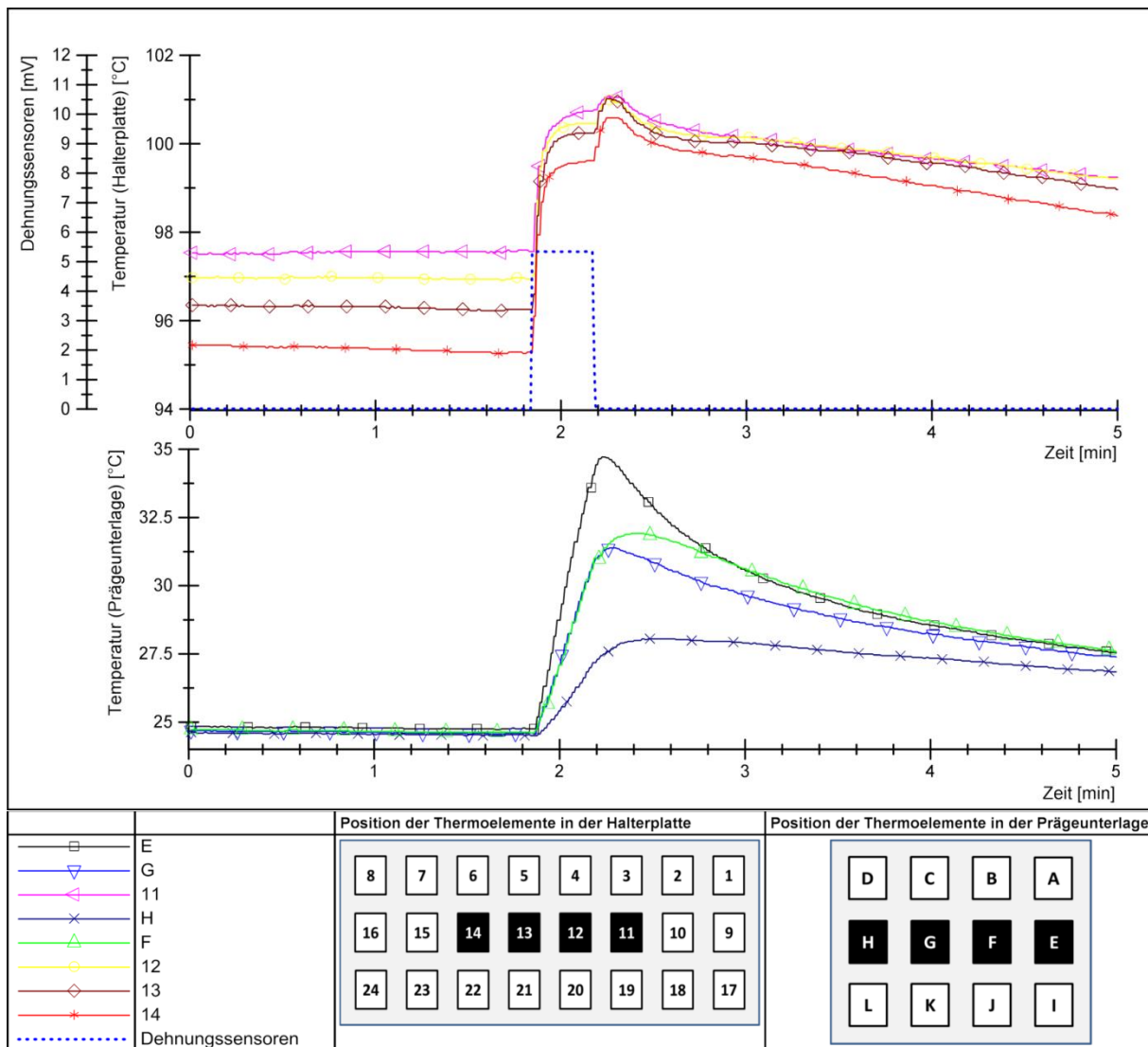


Abb. A9A.4: Temperatur in der Halterplatte und in der Prägeunterlage beim Prägefoliendruckvorgang mit der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** und dem **Stahlprägewerkzeug**: Soll-Temperatur 120 °C, Anpressdruck 40 kN und Prägezeit 20 Sekunden. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung, in der Prägeunterlage – Abb. 5.15 (siehe Seite 74). Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt zwischen 26,7 °C und 27,8 °C.

Anhang 9B. Temperaturmessungen beim Temperaturmessaufbau „Prägefoliendruckvorgang“ für die Prägefolie HS 19-3

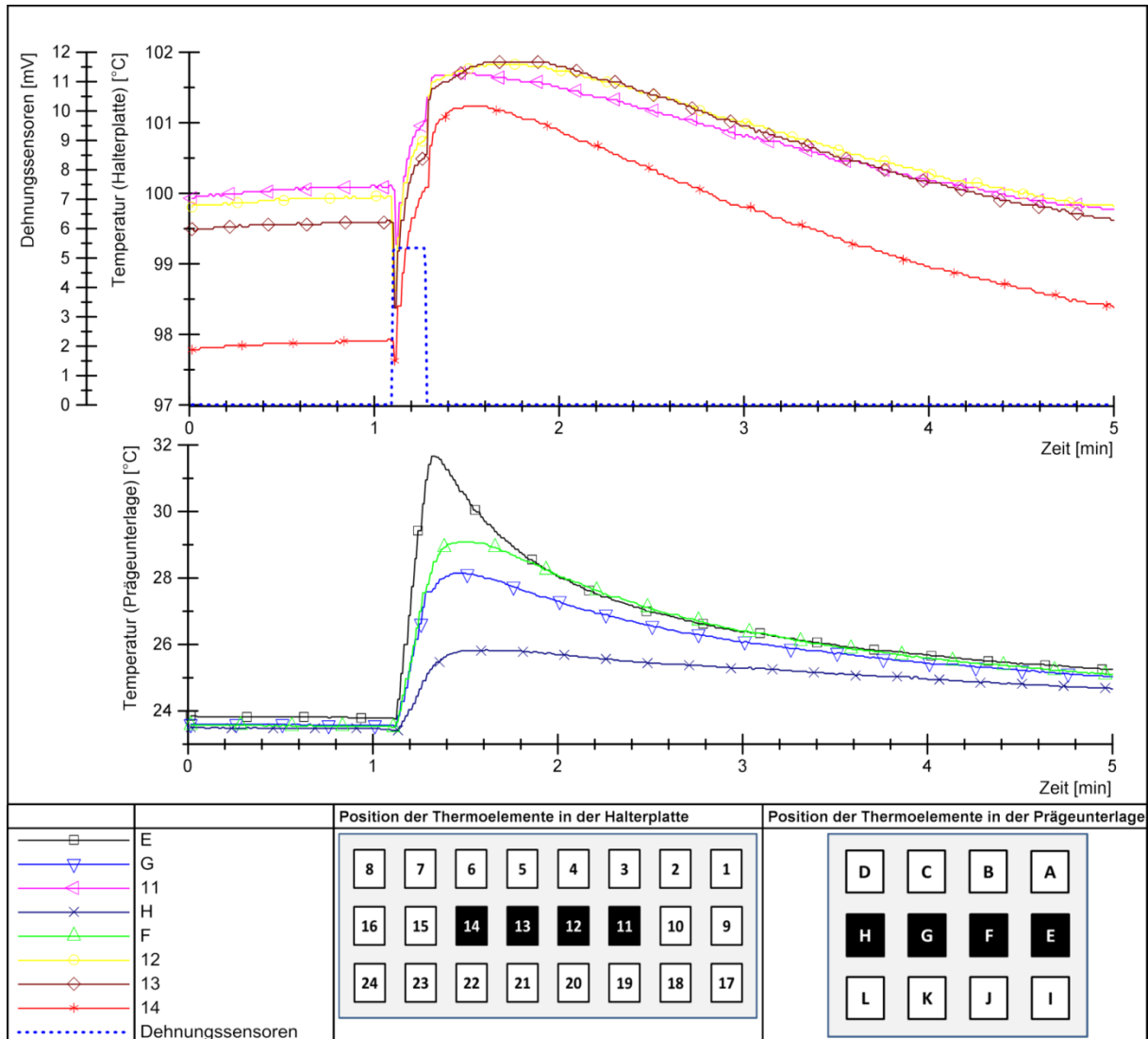


Abb. A9B.1: Temperatur in der Halterplatte und in der Prägeunterlage beim Prägefoliendruckvorgang mit der Prägefolie **HS 19-3** und dem **Messingprägewerkzeug**: Soll-Temperatur 120 °C, Anpressdruck 40 kN und Prägezeit 10 Sekunden. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung, in der Prägeunterlage – Abb. 5.15 (siehe Seite 74). Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt bei 26,7 °C.

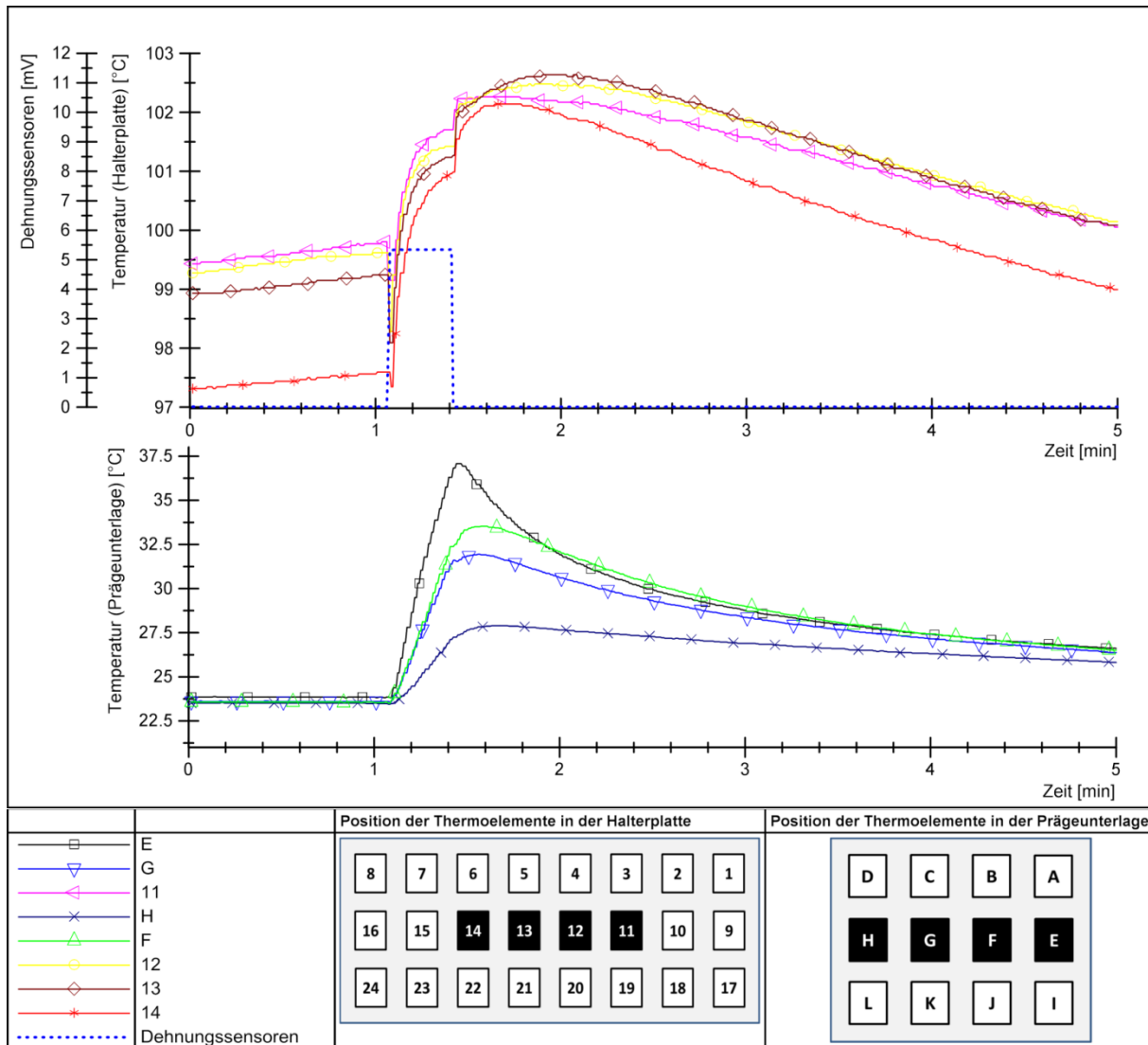


Abb. A9B.2: Temperatur in der Halterplatte und in der Prägeunterlage beim Prägefoliendruckvorgang mit der Prägefolie **HS 19-3** und dem **Messingprägewerkzeug**: Soll-Temperatur 120 °C, Anpressdruck 40 kN und Prägezeit 20 Sekunden. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung, in der Prägeunterlage – Abb. 5.15 (siehe Seite 74). Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt bei 26,8 °C.

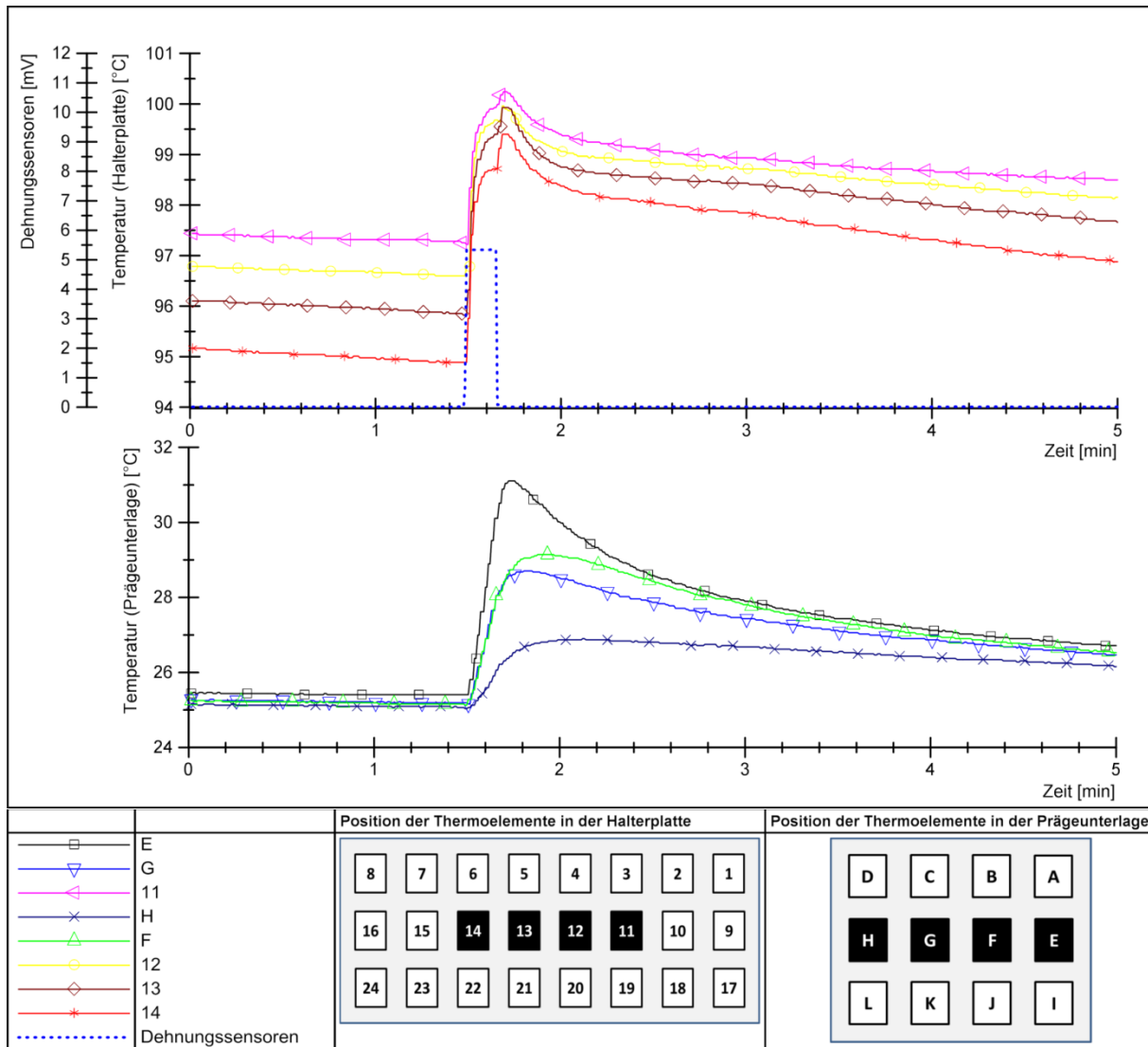


Abb. A9B.3: Temperatur in der Halterplatte und in der Prägeunterlage beim Prägefoliendruckvorgang mit der Prägefolie **HS 19-3** und dem **Stahlprägewerkzeug**: Soll-Temperatur 120 °C, Anpressdruck 40 kN und Prägezeit 10 Sekunden. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung, in der Prägeunterlage – Abb. 5.15 (siehe Seite 74). Die Referenz-Temperatur T_{Referenz} des Field-Point-Geräts liegt bei 28 °C.

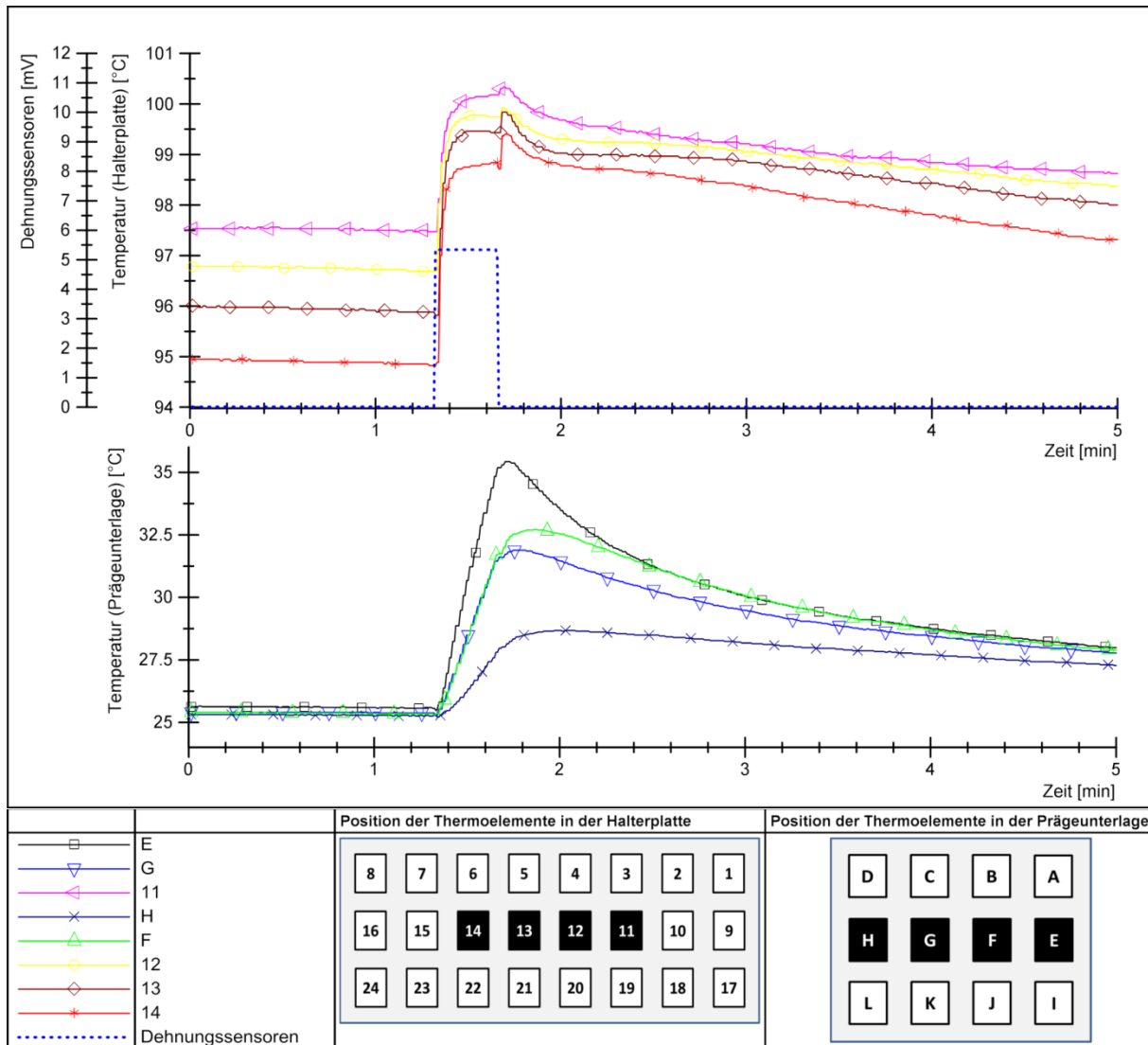


Abb. A9B.4: Temperatur in der Halterplatte und in der Prägeunterlage beim Prägefoliendruckvorgang mit der Prägefolie **HS 19-3** und dem **Stahlprägewerkzeug**: Soll-Temperatur 120 °C, Anpressdruck 40 kN und Prägezeit 20 Sekunden. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung, in der Prägeunterlage – Abb. 5.15 (siehe Seite 74). Die Referenz-Temperatur T_{Referenz} des Field-Point-Geräts liegt bei 28,2 °C.

Anhang 10. Simulation der Prägetemperatur auf Prägewerkzeugoberflächen

Mit den durchgeführten und in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Temperaturmessungen können die Temperaturwerte zwischen der Halterplatte und dem jeweiligen Prägewerkzeug nachvollzogen werden. Es wurde ebenfalls die Annahme gemacht, dass die tatsächlich auf den Oberflächen der Prägewerkzeuge herrschenden Prägetemperaturen den in der Halterplatte gemessenen Temperaturen entsprechen. Zur Überprüfung dieser Annahme wird der Aufheizvorgang der Prägeeinheit mittels der Methode der finiten Elemente (FEM) [GRO09] und dem ANSYS-Programm Version 14.5 [ANS13] simuliert. Hierzu werden die für die Arbeit vorher definierte Prägefoliendrucksystemgrenze (siehe Abschnitt 3.2 und Abb. 3.3 auf Seite 29) erweitert und damit der Heizblock und die Halterplatte in das betrachtete System mit einbezogen.

A10.1 ANSYS-Simulation

Ein vereinfachtes 3D-Modell der Prägeeinheit wird im Programm Siemens NX Version 7.5 [SIE13] gezeichnet. Es besteht aus dem Heizblock A5 mit den integrierten Heizpatronen, der Halterplatte und den beiden Prägewerkzeugen, die im Modell austauschbar sind. Für die CAD-Zeichnung werden die realen Größen der Bestandteile einschließlich der vermessenen Größen der Prägestrukturen verwendet. Allerdings wird bei der Zeichnung des Modells die Symmetrie der Prägeeinheit zur Beschleunigung der Simulation ausgenutzt, indem es entlang y-Achse halbiert wird (Abb. A10.1).

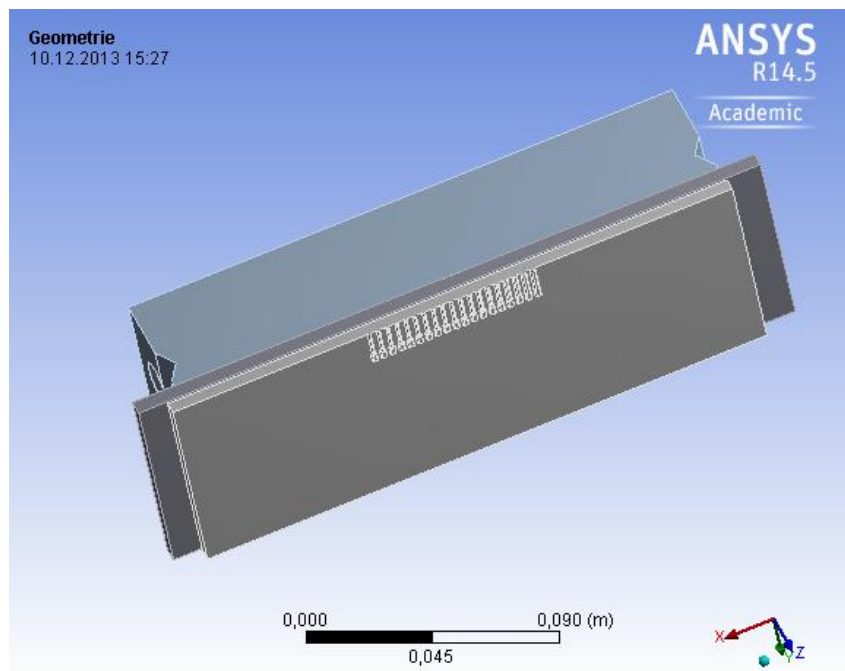


Abb. A10.1: Durch das CAD-Programm realisiertes Modell der Prägeeinheit (halbiert) mit dem Heizblock A5, den Heizpatronen, der Halterplatte und dem Messingprägewerkzeug.

Die CAD-Zeichnung der halbierten Prägeeinheit wird im nächsten Schritt in ANSYS Workbench Platform exportiert, in welchem ein FE-Netz erstellt und die Randbedingungen mit Werkstoffdaten dem erstellten Modell zugeordnet werden. Es wird der Aufheizvorgang der Prägeeinheit von der Umgebungstemperatur auf 100 °C-Soll-Temperatur mit dem Messingprägewerkzeug simuliert. Die Berechnung aller nötigen Koeffizienten und die Vermessung der Heizpatronenleistung wird allerdings für die beiden Prägewerkzeuge durchgeführt, um nachfolgenden Arbeiten in diesem Gebiet eine Ausgangssituation zu erlauben.

A10.1.1 Randbedingungen

Als Aufgabe der ANSYS-Simulation wird eine thermisch-transiente Analyse festgelegt, welche im betrachteten Prägefoliendrucksystem dem Fall mit zeitlich veränderlicher Temperatur in alle drei Richtungen entspricht (thermisch instationäres System nach [BOE11, GRO09, LAN11, POL09, STE07]).

Während der Modellierung werden die jeweiligen Werkstoffe der Prägeeinheit den einzelnen Bestandteilen des Modells zugeordnet: Heizblock – Gusseisen, Heizpatronen – Edelstahl, Halterplatte – Baustahl, Prägewerkzeug – Messing.

Des Weiteren wird das FE-Netz definiert [nach GRO09]. Die meisten Einstellungen dazu können programmgesteuert werden. Die Berechnung der thermischen Simulationen wird mittels eines impliziten Algorithmus durchgeführt. Als geeignete Größe der FE-Elemente für den Heizblock wird 0,008 m und für die weiteren Bestandteile (Halterplatte und Messingprägewerkzeug) 0,002 m mit dem gesamten Anzahl der FE-Elemente bei 111.640 festgelegt (Abb. A10.2).

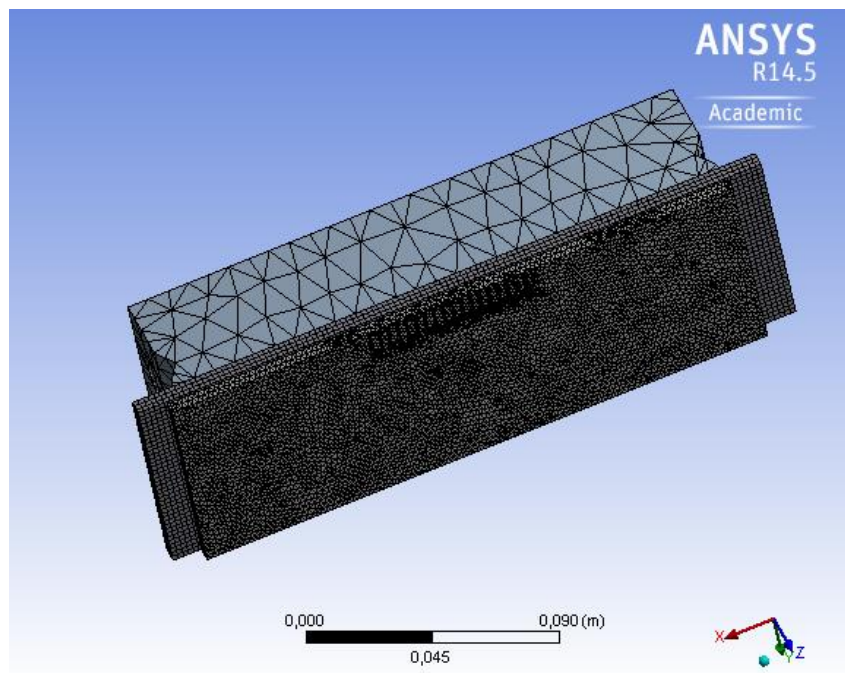


Abb. A10.2: Halbiertes Modell der Prägeeinheit mit dem durch die ANSYS Workbench Platform definierten FE-Netz.

Die Anzahl der Netzelemente hängt von den Anforderungen und dem Ziel der Simulation ab. Je genauere Ergebnisse gefordert werden, desto feiner soll das FE-Netz ausgewählt werden. Mit der Durchführung der ANSYS-Simulation wird das Ziel verfolgt, die in Abschnitt 5.2.1 gemachte Annahme über die Prägetemperaturen auf den Oberflächen der Prägewerkzeuge zu überprüfen. In diesem Zusammenhang ist das FE-Netz mit der gewählten Elementgröße ausreichend.

Als Nächstes werden die Eingaben zu den thermischen Eigenschaften aller Bestandteile des Modells gemacht. Dafür werden die Werkstoffkennwerte (lineare) für die Wärmeleitung aus dem VDI-Wärmeatlas [VDI06] speziell für thermische Analyse unter der Berücksichtigung der realen Werkstoffe in die ANSYS-Simulation übernommen.

Weiter werden Wärmeverluste durch die freie Konvektion in die Umgebung berücksichtigt. Als Umgebungstemperatur wird der Wert von 25 °C festgelegt. Bei der Zuordnung der Konvektion an einzelnen Oberflächen der Bestandteile der halbierten Prägeeinheit werden die berechneten Übergangskoeffizienten verwendet. Sie werden allerdings für die nicht halbierten Bestandteile berechnet, in der Annahme, dass beim halbierten Modell die halbierte Wärmemenge verloren geht und die Übergangskoeffizienten sowohl für das nicht halbierte als auch für das halbierte Modell gleich groß sind.

Die Strahlung findet von allen freistehenden Oberflächen der Bestandteile in die Umgebung und auf weitere außenstehende Bestandteile der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 statt. Aufgrund geringer Größe der Wärmemenge, die durch die Strahlung abgegeben wird, kann die Strahlung in der ANSYS-Simulation vernachlässigt werden. Im weiteren Verlauf befindet sich eine Beispielberechnung (nach Stephan [STE07] und VDI-Wärmeatlas [VDI06]) der Wärmemenge, die von der Oberfläche des nicht halbierten Messingprägewerkzeuges durch die Strahlung verloren geht.

Bei den Temperaturmessungen wurde zur Minimierung des Kontaktwiderstands in den Zwischenschichten der Bestandteile Wärmeleitpaste Servisol verwendet. In der Annahme, dass der Kontaktwiderstand minimal ist, wird dieser in der ANSYS-Simulation nicht berücksichtigt, zudem ist seine Berechnung oftmals sehr aufwändig.

Als Letztes werden die Eingaben zu den Heizpatronen übernommen. Dafür werden die Heizpatronen bereits bei der CAD-Zeichnung in drei Bereiche (entsprechend Abb. 2.14 auf Seite 20 und Anhang 2) unterteilt. Jedem Bereich werden verschiedene Wärmeströme entsprechend der Aufteilung aus den Herstellerangaben zugeordnet.

Die tatsächliche elektrische Leistung der Heizpatronen während des Aufheizens der Prägeeinheit auf 100 °C-Soll-Temperatur wird mittels des Field-Point-Geräts cFP-2120 und eines Leistungsmessgeräts aufgezeichnet.

Wärmeleitung

Die Wärmeleitung in den Bestandteilen der halbierten Prägeeinheit benötigte keine zusätzlichen Eingaben in der thermisch-transienten Analyse. Dafür werden die linearen Werkstoffkennwerte mit der Wärmeleitfähigkeit, der spezifischen Wärmekapazität und der Werkstoffdichte bei 20 °C (aufgrund des geringeren Unterschieds der Werkstoffkennwerte bei höheren Temperaturen) nach VDI-Wärmeatlas [VDI06] übernommen.

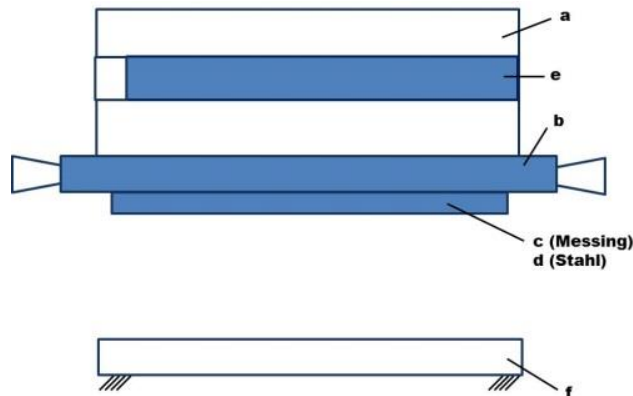


Abb. A10.3: Skizze der Prägeeinheit an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 mit der Prägeunterlage. Die Bezeichnung der Bestandteile: a – Heizblock; b – Halterplatte; c – Messingprägewerkzeug; d – Stahlprägewerkzeug; e – Heizpatronen; f – Prägeunterlage.

a) Heizblock

Werkstoff: Grauguss (GG)

Tabelle A10.1: Werkstoffkennwerte von Grauguss [VDI06].

<i>Temperatur T [°C]</i>	<i>Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]</i>	<i>Spezifische Wärmekapazität c [kJ/kgK]</i>	<i>Dichte ρ [kg/m³]</i>
20	42,5	0,468	7080

b) Halterplatte

Werkstoff: S235JRG2 dünnsschichtvernickelt (ähnlich 1.0315)

Tabelle A10.2: Werkstoffkennwerte von Stahl 1.0315 [VDI06].

<i>Temperatur T [°C]</i>	<i>Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]</i>	<i>Spezifische Wärmekapazität c [kJ/kgK]</i>	<i>Dichte ρ [kg/m³]</i>
20	57	0,43	7850

c) Messingprägewerkzeug

Werkstoff: MS58 (andere Bezeichnung CW614N)

Tabelle A10.3: Werkstoffkennwerte von Messing CW614N [VDI06].

<i>Temperatur T [$^{\circ}\text{C}$]</i>	<i>Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]</i>	<i>Spezifische Wärmekapazität c [kJ/kgK]</i>	<i>Dichte ρ [kg/m^3]</i>
20	108	0,41	8470

d) Stahlprägwerkzeug

Werkstoff: 1.4301

Tabelle A10.4: Werkstoffkennwerte von Stahl 1.4301 [VDI06].

<i>Temperatur T [$^{\circ}\text{C}$]</i>	<i>Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]</i>	<i>Spezifische Wärmekapazität c [kJ/kgK]</i>	<i>Dichte ρ [kg/m^3]</i>
20	15	0,47	7900

e) Heizpatronen

Werkstoff: 1.4301 oder 1.4541

Werkstoffkennwerte: siehe Stahlprägwerkzeug für Stahl 1.4301.

Freie Konvektion

Stoffwerte für Luft bei $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$ und $p = 1$ bar [VDI06]:

$$\lambda_{\infty} = 0,026244 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}},$$

$$\nu_{\infty} = 157,9 \cdot 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}},$$

$$Pr_{\infty} = 0,70745.$$

a) Heizblock

Das Modell des Heizblocks wird für die Berechnung der Übergangskoeffizienten vereinfacht.

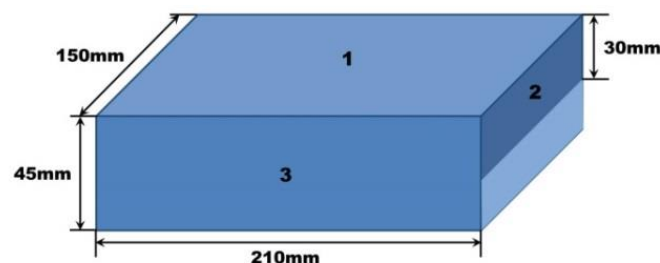


Abb. A10.4: Skizze des Heizblocks A5 mit Maßangaben. Mit 1, 2, 3 sind die Oberflächen gekennzeichnet, von denen die freie Konvektion stattfindet.

a.1. $K_{a1} = 0,21 \text{ m}$, $B_{a1} = 0,15 \text{ m}$.

$$l_{a1} = \frac{K_{a1} \times B_{a1}}{2 \times (K_{a1} + B_{a1})} = \frac{0,0315}{0,72} = 0,044 \text{ m.} \quad (\text{A10.1})$$

Angenommen: $T_{\infty} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{a1,min} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{a1,max} = 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$\beta = \frac{1}{\vartheta_{\infty}} = \frac{1}{298,15\text{K}} = 3,35 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}, \quad (\text{A10.2})$$

$$\begin{aligned} Gr_{a1,min} &= \frac{g \times l_{a1}^3 \times \beta \times (T_{a1,min} - T_{\infty})}{\nu_{\infty}^2} = \\ &= \frac{9,81 \times (0,044)^3 \times 3,35 \cdot 10^{-3} \times 55}{(157,9 \cdot 10^{-7})^2} = \frac{0,154 \cdot 10^{-3}}{2,49 \cdot 10^{-10}} = 61,80 \cdot 10^4, \end{aligned} \quad (\text{A10.3})$$

$$Ra_{a1,min} = Gr_{a1,min} \times Pr_{\infty} = 61,80 \cdot 10^4 \times 0,70745 = 43,75 \cdot 10^4, \quad (\text{A10.4})$$

$$f_2(Pr_{\infty}) = \left[1 + \left(\frac{0,322}{Pr_{\infty}} \right)^{\frac{11}{20}} \right]^{-\frac{20}{11}} = \left[1 + \left(\frac{0,322}{0,70745} \right)^{\frac{11}{20}} \right]^{-\frac{20}{11}} = 0,403. \quad (\text{A10.5})$$

Die Konvektion ist turbulent, weil die Bedingung

$$Ra_{a1,min} \times f_2(Pr_{\infty}) = 17,63 \cdot 10^4 > 7 \cdot 10^4 \quad (\text{A10.6})$$

erfüllt ist, daher gilt bei der Kühlung auf der Unterseite:

$$Nu_{a1,min} = 0,15 \times [Ra_{a1,min} \times f_2(Pr_{\infty})]^{\frac{1}{3}} = 0,15 \times (17,63 \cdot 10^4)^{\frac{1}{3}} = 8,40, \quad (\text{A10.7})$$

$$\alpha_{a1,min} = \frac{Nu_{a1,min} \times \lambda_{\infty}}{l_{a1}} = \frac{8,4 \times 0,026244}{0,044} = 5,01 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}. \quad (\text{A10.8})$$

$$\begin{aligned} Gr_{a1,max} &= \frac{g \times l_{a1}^3 \times \beta \times (T_{a1,max} - T_{\infty})}{\nu_{\infty}^2} = \\ &= \frac{9,81 \times (0,044)^3 \times 3,35 \cdot 10^{-3} \times 95}{(157,9 \cdot 10^{-7})^2} = \frac{0,266 \cdot 10^{-3}}{2,49 \cdot 10^{-10}} = 106,80 \cdot 10^4, \end{aligned} \quad (\text{A10.9})$$

$$Ra_{a1,max} = Gr_{a1,max} \times Pr_{\infty} = 106,80 \cdot 10^4 \times 0,70745 = 75,56 \cdot 10^4, \quad (\text{A10.10})$$

$$\begin{aligned} Nu_{a1,max} &= 0,15 \times [Ra_{a1,max} \times f_2(Pr_{\infty})]^{\frac{1}{3}} = \\ &= 0,15 \times (75,56 \cdot 10^4 \times 0,403)^{\frac{1}{3}} = 10,09, \end{aligned} \quad (\text{A10.11})$$

$$\alpha_{a1,max} = \frac{Nu_{a1,max} \times \lambda_{\infty}}{l_{a1}} = \frac{10,09 \times 0,026244}{0,044} = 6,02 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}. \quad (\text{A10.12})$$

Da die Differenz $\alpha_{a1,max} - \alpha_{a1,min}$ vernachlässigt ist, werden lineare Warmeubergangskoeffizienten α , in der Annahme, dass alle Bestandteile der Prägeeinheit die Soll-Temperatur der GEBA 6 erreichen $T_{a1} = T_{a2} = T_{a3} = 100^{\circ}\text{C}$, berechnet.

So folgt:

$$Gr_{a1} = \frac{g \times l_{a1}^3 \times \beta \times (T_{a1} - T_{\infty})}{\nu_{\infty}^2} = \quad (A10.13)$$

$$= \frac{9,81 \times (0,044)^3 \times 3,35 \cdot 10^{-3} \times 75}{(157,9 \cdot 10^{-7})^2} = \frac{20,99 \cdot 10^{-5}}{2,49 \cdot 10^{-10}} = 84,32 \cdot 10^4,$$

$$Ra_{a1} = Gr_{a1} \times Pr_{\infty} = 84,32 \cdot 10^4 \times 0,70745 = 59,65 \cdot 10^4, \quad (A10.14)$$

$$Nu_{a1} = 0,15 \times [Ra_{a1} \times f_2(Pr_{\infty})]^{\frac{1}{3}} = \quad (A10.15)$$

$$= 0,15 \times (59,65 \cdot 10^4 \times 0,403)^{\frac{1}{3}} = 9,33,$$

$$\alpha_{a1} = \frac{Nu_{a1} \times \lambda_{\infty}}{l_{a1}} = \frac{9,33 \times 0,026244}{0,044} = 5,56 \frac{W}{m^2 \cdot K}. \quad (A10.16)$$

a.2. $l_{a2} = 0,03$ m.

$$Gr_{a1} = \frac{g \times l_{a2}^3 \times \beta \times (T_{a2} - T_{\infty})}{\nu_{\infty}^2} = \quad (A10.17)$$

$$= \frac{9,81 \times (0,03)^3 \times 3,35 \cdot 10^{-3} \times 75}{(157,9 \cdot 10^{-7})^2} = \frac{0,066 \cdot 10^{-3}}{2,49 \cdot 10^{-10}} = 26,73 \cdot 10^4,$$

$$Ra_{a2} = Gr_{a2} \times Pr_{\infty} = 26,73 \cdot 10^4 \times 0,70745 = 18,90 \cdot 10^4, \quad (A10.18)$$

$$f_1(Pr_{\infty}) = \left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr_{\infty}} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{-\frac{16}{9}} = \left[1 + \left(\frac{0,492}{0,70745} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{-\frac{16}{9}} = 0,346. \quad (A10.19)$$

Sowohl für die laminare als auch turbulente Konvektion gilt:

$$Nu_{a2} = \left[0,825 + 0,387 \times [Ra_{a2} \times f_1(Pr_{\infty})]^{\frac{1}{6}} \right]^2 = \left[0,825 + 0,387 \times \right. \quad (A10.20)$$

$$\left. \times [18,90 \cdot 10^4 \times 0,346]^{\frac{1}{6}} \right]^2 = 10,77,$$

$$\alpha_{a2} = \frac{Nu_{a2} \times \lambda_{\infty}}{l_{a2}} = \frac{10,77 \times 0,026244}{0,03} = 9,42 \frac{W}{m^2 \cdot K}. \quad (A10.21)$$

α_{a2} ist identisch für die beiden Seiten des Heizblocks aufgrund seiner Symmetrie.

a.3. $l_{a3} = 0,045$ m.

$$Gr_{a3} = \frac{g \times l_{a3}^3 \times \beta \times (T_{a3} - T_{\infty})}{v_{\infty}^2} = \quad (A10.22)$$

$$= \frac{9,81 \times (0,045)^3 \times 3,35 \cdot 10^{-3} \times 75}{(157,9 \cdot 10^{-7})^2} = \frac{0,225 \cdot 10^{-3}}{2,49 \cdot 10^{-10}} = 90,36 \cdot 10^4,$$

$$Ra_{a3} = Gr_{a3} \times Pr_{\infty} = 90,36 \cdot 10^4 \times 0,70745 = 63,80 \cdot 10^4, \quad (A10.23)$$

$$Nu_{a3} = \left[0,825 + 0,387 \times [Ra_{a3} \times f_1(Pr_{\infty})]^{\frac{1}{6}} \right]^2 = \left[0,825 + 0,387 \times \right. \quad (A10.24)$$

$$\left. \times [63,80 \cdot 10^4 \times 0,346]^{\frac{1}{6}} \right]^2 = 14,69,$$

$$\alpha_{a3} = \frac{Nu_{a3} \times \lambda_{\infty}}{l_{a3}} = \frac{14,69 \times 0,026244}{0,045} = 8,57 \frac{W}{m^2 \cdot K}. \quad (A10.25)$$

α_{a3} wird ebenfalls, wie α_{a2} , zwei Mal in der Simulation eingegeben: von den beiden Seiten des Heizblocks.

b) Halterplatte

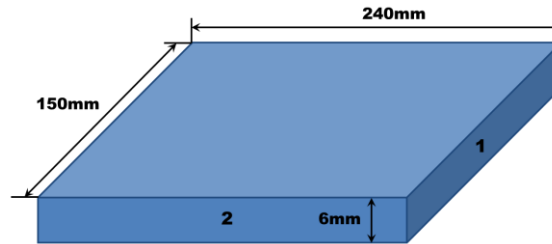


Abb. A10.5: Skizze der Halterplatte mit Maßangaben. Mit 1, 2 sind die Oberflächen gekennzeichnet, von denen die freie Konvektion stattfindet.

b.1. $l_{b1} = 0,006$ m.

In Annahme, dass $T_{b1} = T_{b2} = 100$ °C folgt:

$$Gr_{b1} = \frac{g \times l_{b1}^3 \times \beta \times (T_{b1} - T_{\infty})}{v_{\infty}^2} = \quad (A10.26)$$

$$= \frac{9,81 \times (0,006)^3 \times 3,35 \cdot 10^{-3} \times (100 - 25)}{(157,9 \cdot 10^{-7})^2} = \frac{5,32 \cdot 10^{-7}}{2,49 \cdot 10^{-10}} = 21,37 \cdot 10^2,$$

$$Ra_{b1} = Gr_{b1} \times Pr_{\infty} = 21,37 \cdot 10^2 \times 0,70745 = 15,12 \cdot 10^2, \quad (A10.27)$$

$$Nu_{b1} = \left[0,825 + 0,387 \times [Ra_{b1} \times f_1(Pr_{\infty})]^{\frac{1}{6}} \right]^2 = \left[0,825 + 0,387 \times \right. \quad (A10.28)$$

$$\left. \times [15,12 \cdot 10^2 \times 0,346]^{\frac{1}{6}} \right]^2 = 3,70,$$

$$\alpha_{b1} = \frac{Nu_{b1} \times \lambda_{\infty}}{l_{b1}} = \frac{3,7 \times 0,026244}{0,006} = 16,18 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (\text{A10.29})$$

α_{b1} gilt für die beiden Seiten der Halterplatte. Da $l_{b2} = l_{b1} = 0,006 \text{ m}$ ist, gilt α_{b1} auch für die Oberfläche 2 der Halterplatte. So ergibt sich $\alpha_{b1} = \alpha_{b2} = 16,18 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$, wobei α_{b1} für alle vertikalen Oberflächen der Halterplatte angenommen werden kann.

Freie Konvektion an den offenen horizontalen Oberflächen wird zur Vereinfachung vernachlässigt, da die abgegebene Wärmemenge dadurch klein ist.

c) Messingprägwerkzeug

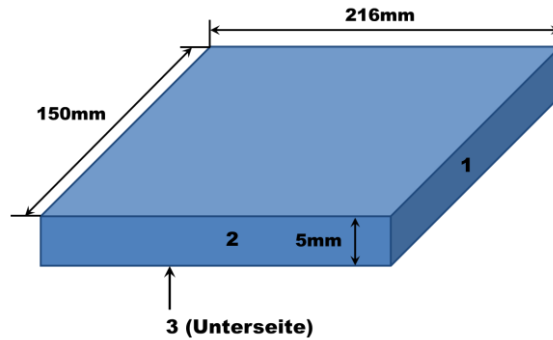


Abb. A10.6: Skizze des Messingprägwerkzeuges mit Maßangaben. Mit 1, 2, 3 sind die Oberflächen gekennzeichnet, von denen die freie Konvektion stattfindet.

c.1. $l_{b1} = 0,005 \text{ m}$.

Gleich dem Fall für die Halterplatte ist $l_{c1} = l_{c2} = 0,005 \text{ m}$, sodass $\alpha_{c1} = \alpha_{c2}$. So ist für alle vertikalen Oberflächen des Messingprägwerkzeuges der gleiche Wärmeübergangskoeffizient anzunehmen.

Es wird für $T_{c1} = T_{c2} = T_{c3} = 100 \text{ °C}$ der Wärmeübergangskoeffizient berechnet.

$$Gr_{c1} = \frac{g \times l_{c1}^3 \times \beta \times (T_{c1} - T_{\infty})}{\nu_{\infty}^2} = \quad (\text{A10.30})$$

$$= \frac{9,81 \times (0,005)^3 \times 3,35 \cdot 10^{-3} \times (100 - 25)}{(157,9 \cdot 10^{-7})^2} = \frac{3,08 \cdot 10^{-7}}{2,49 \cdot 10^{-10}} = 12,37 \cdot 10^2,$$

$$Ra_{c1} = Gr_{c1} \times Pr_{\infty} = 12,37 \cdot 10^2 \times 0,70745 = 8,75 \cdot 10^2, \quad (\text{A10.31})$$

$$Nu_{c1} = \left[0,825 + 0,387 \times [Ra_{c1} \times f_1(Pr_{\infty})]^{\frac{1}{6}} \right]^2 = \left[0,825 + 0,387 \times \right. \quad (\text{A10.32})$$

$$\left. \times [8,75 \cdot 10^2 \times 0,346]^{\frac{1}{6}} \right]^2 = 3,34,$$

$$\alpha_{c1} = \frac{Nu_{c1} \times \lambda_{\infty}}{l_{c1}} = \frac{3,34 \times 0,026244}{0,005} = 17,53 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (\text{A10.33})$$

So ergibt sich für die Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{c1} = \alpha_{c2} = 17,53 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$.

c.3. $K_{c3} = 0,216 \text{ m}$,

$$B_{c3} = 0,15 \text{ m.}$$

$$l_{c3} = \frac{K_{c3} \times B_{c3}}{2 \times (K_{c3} + B_{c3})} = \frac{0,216 \times 0,15}{2 \times (0,216 + 0,15)} = \frac{0,0324}{0,732} = 0,044 \text{ m,} \quad (\text{A10.34})$$

$$\begin{aligned} Gr_{c3} &= \frac{g \times l_{c3}^3 \times \beta \times (T_{c3} - T_{\infty})}{\nu_{\infty}^2} = \\ &= \frac{9,81 \times (0,044)^3 \times 3,35 \cdot 10^{-3} \times (100 - 25)}{(157,9 \cdot 10^{-7})^2} = \frac{20,99 \cdot 10^{-5}}{2,49 \cdot 10^{-10}} = 84,29 \cdot 10^4, \end{aligned} \quad (\text{A10.35})$$

$$Ra_{c3} = Gr_{c3} \times Pr_{\infty} = 84,29 \cdot 10^4 \times 0,70745 = 59,65 \cdot 10^4. \quad (\text{A10.36})$$

Bei der Wärmeabgabe auf der Unterseite gilt:

$$Nu_{c3} = 0,6 \times [Ra_{c3} \times f_1(Pr_{\infty})]^{\frac{1}{5}} = 0,6 \times [59,65 \cdot 10^4 \times 0,346]^{\frac{1}{5}} = 6,94, \quad (\text{A10.37})$$

$$\alpha_{c3} = \frac{Nu_{c3} \times \lambda_{\infty}}{l_{c3}} = \frac{6,94 \times 0,026244}{0,044} = 4,14 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}. \quad (\text{A10.38})$$

Die aufwändige Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten für die gravierten Pregestrukturen des Messingpregewerkzeuges wird aufgrund geringer Wärmeabgabe durch diese Oberflächen nicht durchgeführt.

d) Stahlpregewerkzeug

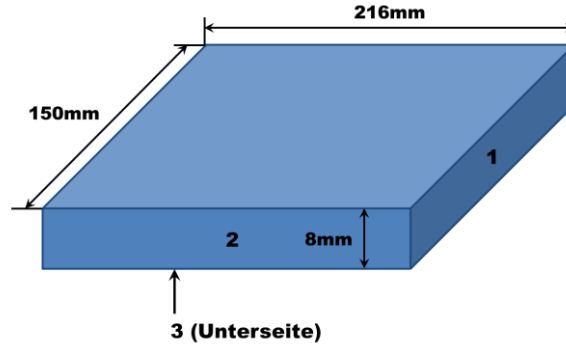


Abb. A10.7: Skizze des Stahlpregewerkzeuges mit Maßangaben. Mit 1, 2, 3 sind die Oberflächen gekennzeichnet, von denen die freie Konvektion stattfindet.

d.1. $l_{d1} = l_{d2} = 0,008 \text{ m}$, sodass gilt $\alpha_{d1} = \alpha_{d2}$.

Weiterhin gilt $T_{d1} = T_{d2} = T_{d3} = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$Gr_{d1} = \frac{g \times l_{d1}^3 \times \beta \times (T_{d1} - T_{\infty})}{\nu_{\infty}^2} = \quad (\text{A10.39})$$

$$= \frac{9,81 \times (0,008)^3 \times 3,35 \cdot 10^{-3} \times (100 - 25)}{(157,9 \cdot 10^{-7})^2} = \frac{1,26 \cdot 10^{-6}}{2,49 \cdot 10^{-10}} = 50,60 \cdot 10^2,$$

$$Ra_{d1} = Gr_{d1} \times Pr_{\infty} = 50,60 \cdot 10^2 \times 0,70745 = 35,79 \cdot 10^2, \quad (\text{A10.40})$$

$$Nu_{d1} = \left[0,825 + 0,387 \times [Ra_{d1} \times f_1(Pr_{\infty})]^{\frac{1}{6}} \right]^2 = \left[0,825 + 0,387 \times \right. \\ \left. \times [35,79 \cdot 10^2 \times 0,346]^{\frac{1}{6}} \right]^2 = 4,38, \quad (A10.41)$$

$$\alpha_{d1} = \frac{Nu_{d1} \times \lambda_{\infty}}{l_{d1}} = \frac{4,38 \times 0,026244}{0,008} = 14,37 \frac{W}{m^2 \cdot K}. \quad (A10.42)$$

$\alpha_{d1} = \alpha_{d2} = 14,37 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ gilt für alle vertikalen Oberflächen des Stahlprägwerkzeuges.

Aufgrund gleicher Größen der horizontalen Oberflächen der beiden Prägwerkzeuge und den angenommenen Randbedingungen folgt $\alpha_{d3} = \alpha_{c3} = 4,14 \frac{W}{m^2 \cdot K}$.

Die aufwändige Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten für die gravierten Prägestrukturen des Stahlprägwerkzeuges wird ebenfalls aufgrund geringer Wärmeabgabe durch diese Oberflächen nicht durchgeführt.

Strahlung

Die Wärmemenge, welche z. B. das Messingprägwerkzeug mit $\vartheta_c = T_c + 273,15 = 373,15 \text{ K}$ ($T_c = 100 \text{ °C}$) an die Prägeunterlage mit $\vartheta_f = T_f + 273,15 = 298,15 \text{ K}$ ($T_f = 25 \text{ °C}$) abgibt, folgt aus

$$\dot{Q}_s = C_{cf} \times A_c \times \left(\left(\frac{\vartheta_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{\vartheta_f}{100} \right)^4 \right) [\text{STE07}], \quad (A10.43)$$

$$\text{wobei } C_{cf} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{1}{\varepsilon_f} - 1} \text{ mit } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} [\text{STE07}]. \quad (A10.44)$$

Nach VDI-Wärmeatlas [VDI06] werden $\varepsilon_c = 0,61$ (Messing, oxidiert, bei 100 °C) und für $\varepsilon_f = 0,26$ (Stahl, poliert, bei 127 °C) eingesetzt.

So folgt:

$$C_{cf} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8}}{\frac{1}{0,61} + \frac{1}{0,26} - 1} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8}}{1,64 + 3,85 - 1} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8}}{4,49} = 1,26 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}.$$

Und daraus

$$\dot{Q}_s = 1,26 \cdot 10^{-8} \times (0,15 \times 0,216) \times \left(\left(\frac{373,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{298,15}{100} \right)^4 \right) = \\ = 1,26 \cdot 10^{-8} \times 0,0324 \times \\ \times (193,9 - 79) = 4,70 \cdot 10^{-8} \text{ W}.$$

Der Wert \dot{Q}_s ist nur ein kleiner Teil der gesamten Wärmemenge, die in die Prägeeinheit eingeführt wird.

Es ist anzunehmen, dass die Wärmemenge, die von den weiteren Bestandteilen der Prägeeinheit durch die Strahlung an umgebende Körper abgegeben wird, in gleicher Größenordnung, wie \dot{Q}_s , ist.

Messungen der elektrischen Leistung der Heizpatronen

Die elektrische Leistung aller vier Heizpatronen des Heizblocks A5 wird mittels des Leistungsmessgeräts HM8115-2 der Firma HAMEG Instruments [HAM13] bestimmt, welches dem Heizblock vorgeschaltet wird. Gleichzeitig mit den berechneten Leistungswerten werden die gemessenen Spannungs- und Stromstärke mitangezeigt. Die ermittelten Leistungswerte werden vom bereits für die Temperaturmessungen angeschlossenen Field-Point-Gerät (siehe Abschnitt 5.2) eingelesen und als eigenständige Datei gespeichert.

Der während der Messungen entstandene Fehler beim Umschalten der Messbereiche des Leistungsmessgeräts wird durch die vorstehenden Messwerte kompensiert.

Ergebnisse

Der Verlauf der von den vier Heizpatronen aufgenommenen Leistung während des Aufheizens der Prägeeinheit mit dem Messingprägwerkzeug auf 100 °C-Soll-Temperatur ist in Abb. A10.8 dargestellt. Für das Stahlprägwerkzeug ist ein ähnliches Ergebnis in Abb. A10.9 zu sehen.

Aus Abb. A10.8 und Abb. A10.9 ist zu beobachten, dass in der Aufheizphase der Prägeeinheit die maximale elektrische Leistung in den Heizpatronen, die den Wert 2200 Watt etwas übersteigt, erzeugt wird. Dieser Zeitabschnitt dauert ca. 5,4 min beim Messingprägwerkzeug und ca. 5,8 Minuten beim Stahlprägwerkzeug.

Im nächsten Schritt werden die Heizpatronen für 0,5-1,0 Minuten kurzzeitig ein- und ausgeschaltet. Danach wird die Prägeeinheit innerhalb der nächsten 20 Minuten abgekühlt. Währenddessen werden die Heizpatronen ausgeschaltet. Weitere Nachheizvorgänge erfolgen mit teilweise niedriger elektrischer Leistung mit dem regelmäßigen Ausschalten der Heizpatronen.

Diese Ergebnisse bestätigen und erklären die Temperaturverläufe, die in Abschnitt 5.2.1 vorgestellt sind.

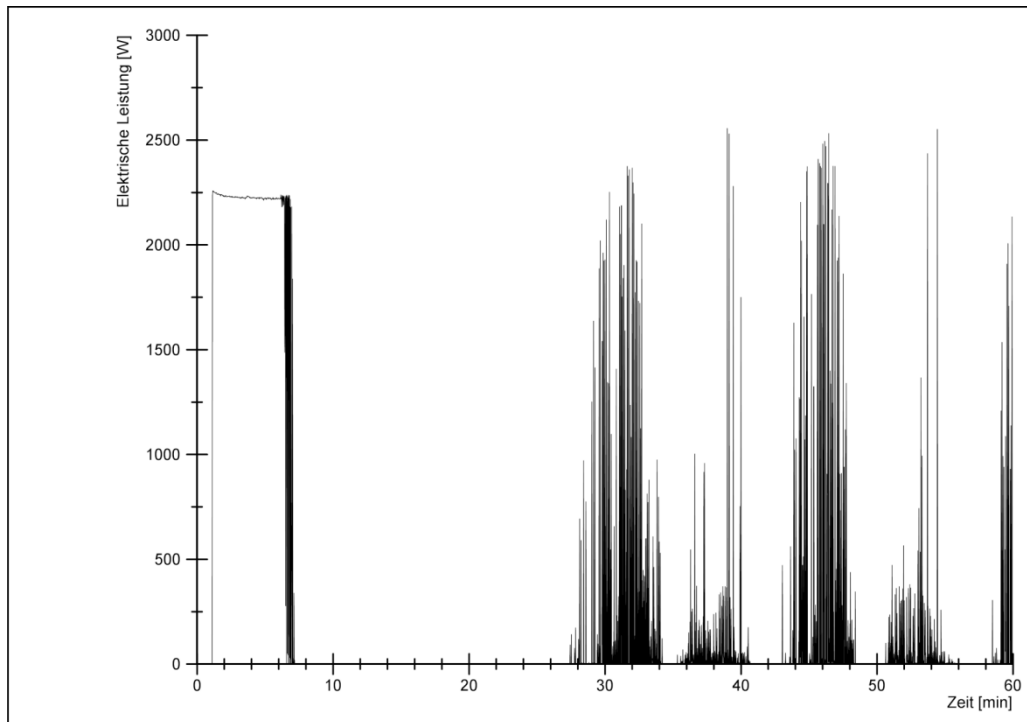


Abb. A10.8: Verlauf der von den vier Heizpatronen aufgenommenen Leistung während des Aufheizens der Prägeeinheit an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 mit dem **Messingprägwerkzeug** auf 100 °C-Soll-Temperatur. Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt bei 29,5 °C.

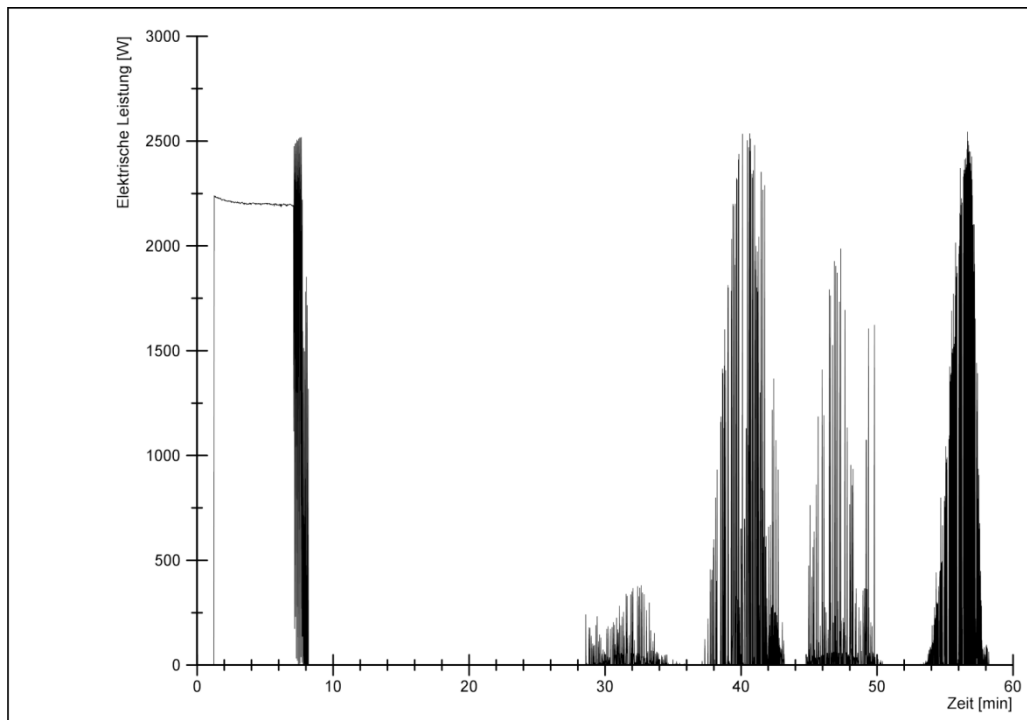


Abb. A10.9: Verlauf der von den vier Heizpatronen aufgenommenen Leistung während des Aufheizens der Prägeeinheit an der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 mit dem **Stahlprägwerkzeug** auf 100 °C-Soll-Temperatur. Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt zwischen 24 °C und 26 °C.

A10.1.2 Ergebnisse

Die ANSYS-Simulationsergebnisse in Abb. A10.10 und Abb. A10.11 zeigen die simulierte Temperaturverteilung im Modell der Prägeeinheit mit dem Messingprägewerkzeug nach 2000 Sekunden (ca. 33,33 Minuten) nach dem Einschalten des Heizsystems der GEBA 6. Dieser Moment entspricht ungefähr dem in Abschnitt 5.2.1 festgestellten und empfohlenen Zeitraum für das Aufheizen der Prägeeinheit bis zum Einpendeln der Temperaturen (siehe Abb. 5.8 auf Seite 69). Abb. A10.10 stellt die Temperaturverteilung auf der Fläche der Halterplatte und Abb. A10.11 auf der Oberfläche des Messingprägewerkzeuges dar.

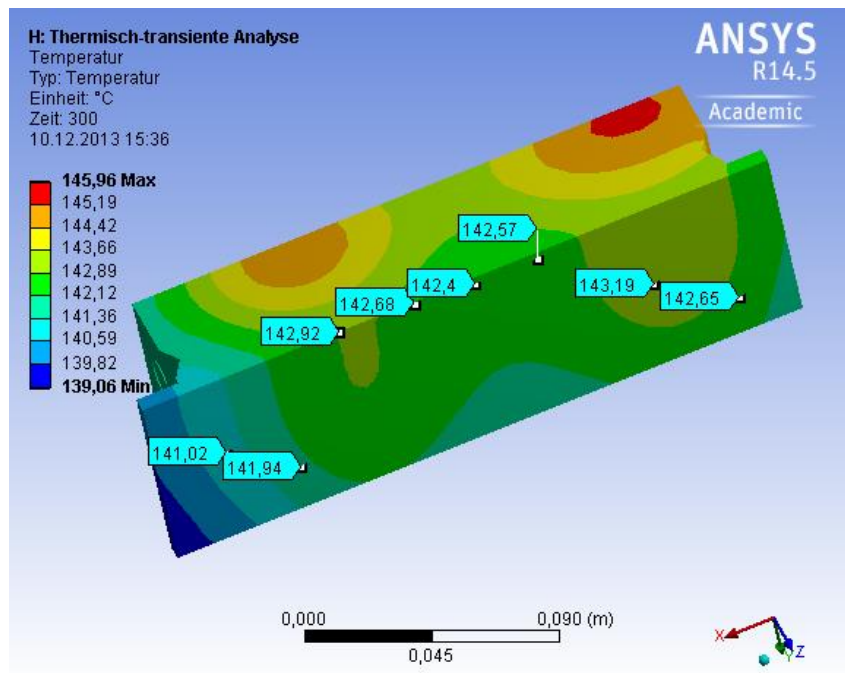


Abb. A10.10: ANSYS-Simulationsergebnisse für die Wärmeausbreitung in der Prägeeinheit der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 mit dem eingesetzten **Messingprägewerkzeug** und die Temperaturverteilung auf der Fläche der Halterplatte nach 2000 Sekunden des Heizsystembetriebs. Die Temperaturen auf der Fläche der Halterplatte befinden sich im Bereich 139,0-143,5 °C.

In diesem Moment befinden sich die Temperaturen auf der Fläche der Halterplatte im Bereich 139,0-143,5 °C und auf der Oberfläche des Messingprägewerkzeuges im Bereich 140,0-143,0 °C.

Die angezeigten Messpunkte für die Temperatur in Abb. A10.10 und Abb. A10.11 entsprechen annähernd den Positionen der Thermoelemente bei den in Abschnitt 5.2.1 durchgeführten Messungen. Wie aus den Ergebnissen zu sehen ist, verteilen sich die Temperaturen in A10.10 mit max. 4,5 °C-Schwankung über die Flächen und liegen über der Soll-Temperatur von 100 °C.

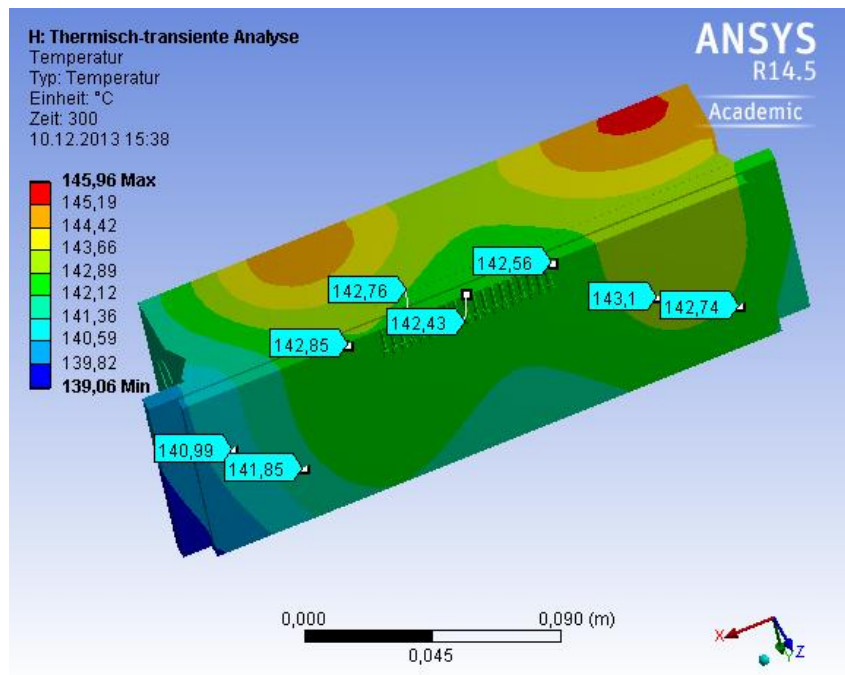


Abb. A10.11: ANSYS-Simulationsergebnisse für die Wärmeausbreitung in der Prägeeinheit der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 mit dem eingesetzten **Messingprägwerkzeug** und die Temperaturverteilung auf der Oberfläche des Messingprägwerkzeuges nach 2000 Sekunden des Heizsystembetriebs. Die Temperaturen auf der Fläche der Halterplatte befinden sich im Bereich 140,0-143,0 °C.

In Abb. A10.12 und Abb. A10.13 sind die ANSYS-Simulationsergebnisse nach 3600 Sekunden (entsprechend 1 Stunde) des Heizsystembetriebs dargestellt.

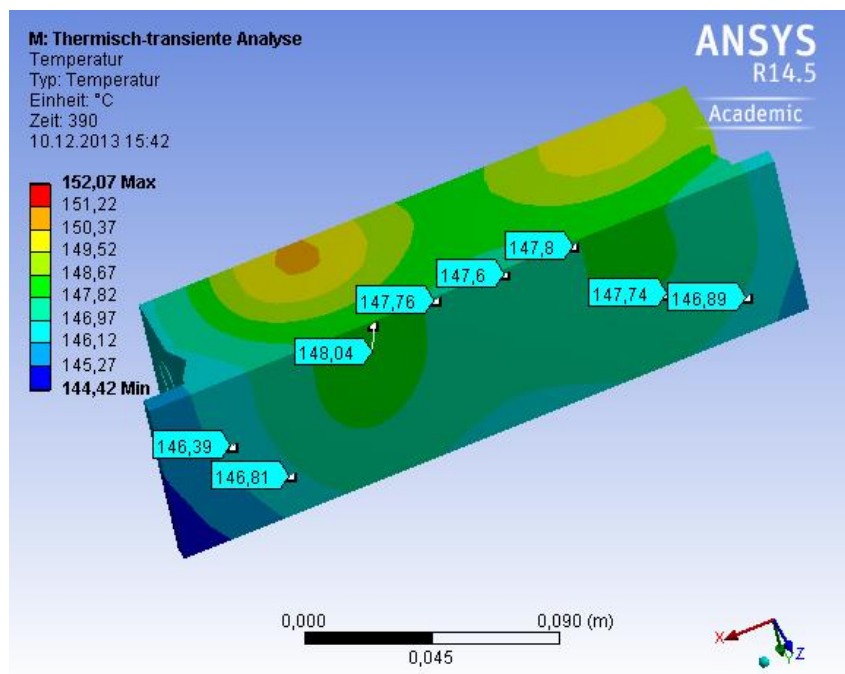


Abb. A10.12: ANSYS-Simulationsergebnisse für die Wärmeausbreitung in der Prägeeinheit der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 mit dem eingesetzten **Messingprägwerkzeug** und die Temperaturverteilung auf der Fläche der Halterplatte nach 3600 Sekunden des Heizsystembetriebs. Die Temperaturen auf der Fläche der Halterplatte befinden sich im Bereich 144,5-148,5 °C.

Die Ergebnisse nach 3600 Sekunden des Heizsystembetriebs entsprechen dem Moment kurz nach Wiedernachheizen der Prägeeinheit (siehe Abb. A10.8) und daher sind die simulierten Temperaturen höher als die gleichen nach 2000 Sekunden. So befinden sich die Temperaturen auf der Fläche der Halterplatte im Bereich 144,5-148,5 °C und auf der Oberfläche des Messingprägwerkzeuges im Bereich 145,0-148,5 °C.

Die angezeigten Messpunkte für die Temperatur in Abb. A10.12 und Abb. A10.13 entsprechen ebenfalls annähernd den Positionen der Thermoelemente bei den in Abschnitt 5.2.1 durchgeführten Messungen. Die Schwankung über die Flächen in Abb. A10.12 liegt bei ca. 4,0 °C und die simulierten Temperaturen übersteigen ebenfalls die angenommene Soll-Temperatur von 100 °C.

Im Allgemeinen sind die Temperaturen in der Prägeeinheit entsprechend den ANSYS-Simulationsergebnissen inhomogen. Diese Inhomogenität ist durch die Aufteilung der Heizpatronen in drei Bereiche, an den unterschiedliche Spannungen anliegen, verursacht. Der Verlauf der maximalen und minimalen Temperaturen in der Prägeeinheit während einer Stunde des Heizsystembetriebs nach der ANSYS-Simulation ist in Abb. A10.14 zu sehen.

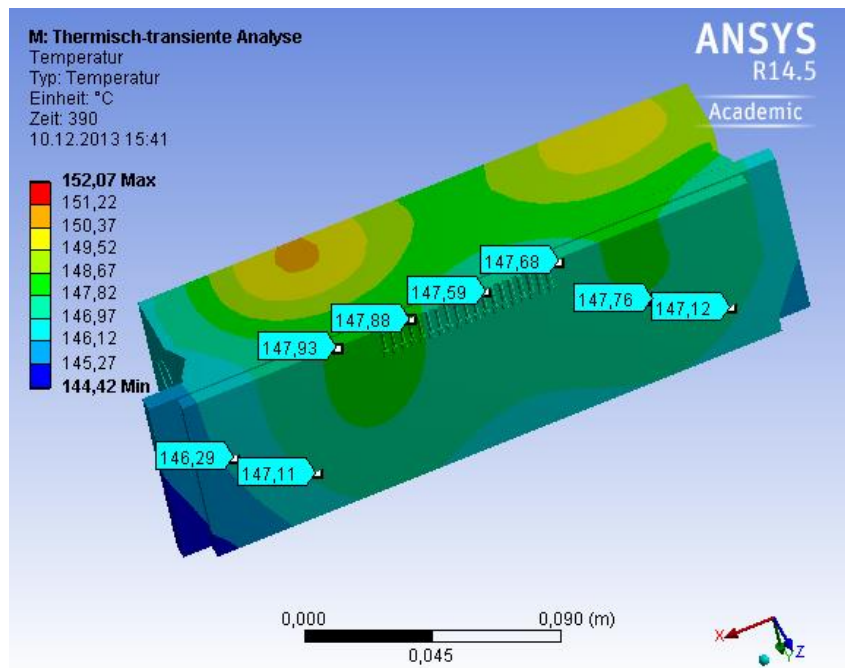


Abb. A10.13: ANSYS-Simulationsergebnisse für die Wärmeausbreitung in der Prägeeinheit der Prägefoliendruckmaschine GEBA 6 mit dem eingesetzten **Messingprägwerkzeug** und die Temperaturverteilung auf der Oberfläche des Messingprägwerkzeuges nach 3600 Sekunden des Heizsystembetriebs. Die Temperaturen auf der Fläche der Halterplatte befinden sich im Bereich 145,0-148,5 °C.

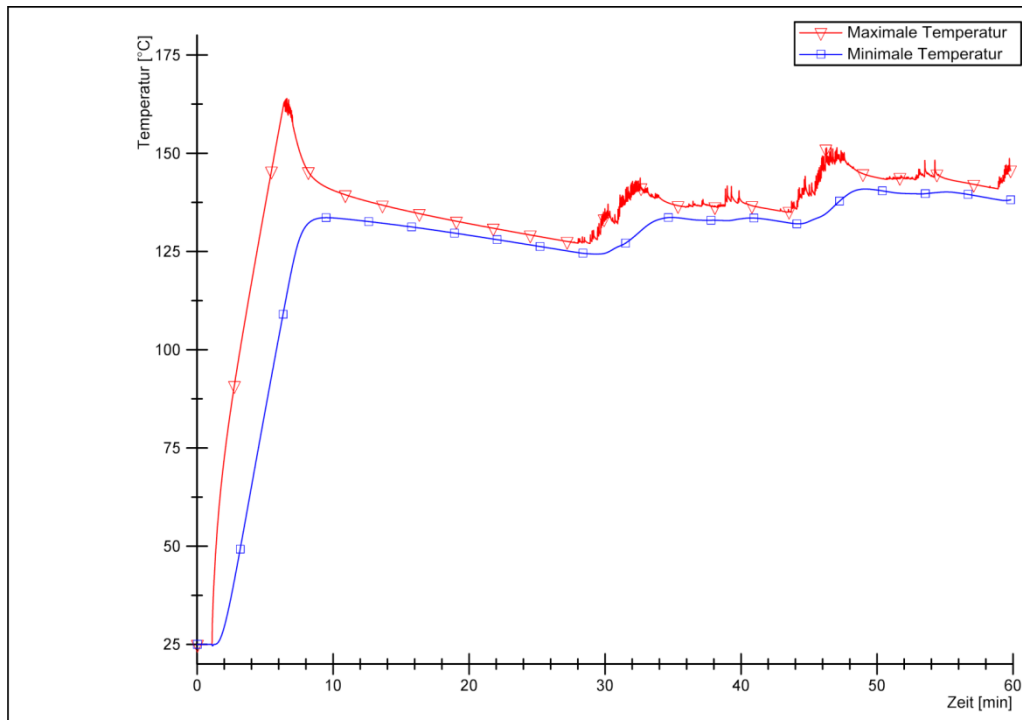


Abb. A10.14: Entsprechender der ANSYS-Simulation Verlauf der maximalen und minimalen Temperaturen in der Prägeeinheit während einer Stunde des Heizsystembetriebs beim Aufheizen der Prägeeinheit mit dem **Messingprägewerkzeug** von der Umgebungstemperatur von 25 °C auf die Soll-Temperatur von 100 °C.

Die maximalen Temperaturen (nahe der Heizpatronen) erreichen einen maximalen Punkt in Höhe von 171,8 °C während des Aufheizens der Prägeeinheit noch in den ersten Minuten. Danach sinken die maximalen Temperaturen auf bis 132,9 °C ab, in diesem Zeitraum sind die Heizpatronen abgeschaltet (siehe Abb. A10.8). Im weiteren Verlauf werden die Heizpatronen schrittweise ein- und ausgeschaltet, dadurch erhöhen sich die Temperaturen sich in den nächsten 30 Minuten auf bis zu max. 160,0 °C. Die minimalen Temperaturen (an den Rändern der Halterplatte und des Messingprägewerkzeuges) steigen während des Aufheizens auf bis zu 141,5 °C. Nach dem Abkühlen auf bis zu 132,9 °C erhöhen sich die minimalen Temperaturen im weiteren Verlauf auf bis zu 148,0 °C.

A10.1.3 Diskussion und Zusammenfassung

Die ANSYS-Simulationsergebnisse zeigen die Wärmeausbreitung und die Temperaturverteilungen auf den Flächen der Halterplatte und des Messingprägewerkzeuges während des Aufheizens der Prägeeinheit auf die Soll-Temperatur von 100 °C innerhalb von einer Stunde. Dabei übersteigen die simulierten Temperaturen in der Halterplatte den Soll-Wert von 100 °C im Durchschnitt um 47,2 °C (nach dem Einpendeln der Temperaturen). Bezogen auf den gemessenen Mittelwert der Temperaturen in der Halterplatte (siehe Abb. A10.15) liegt die Differenz der ANSYS-Simulation bei 69,4 %.

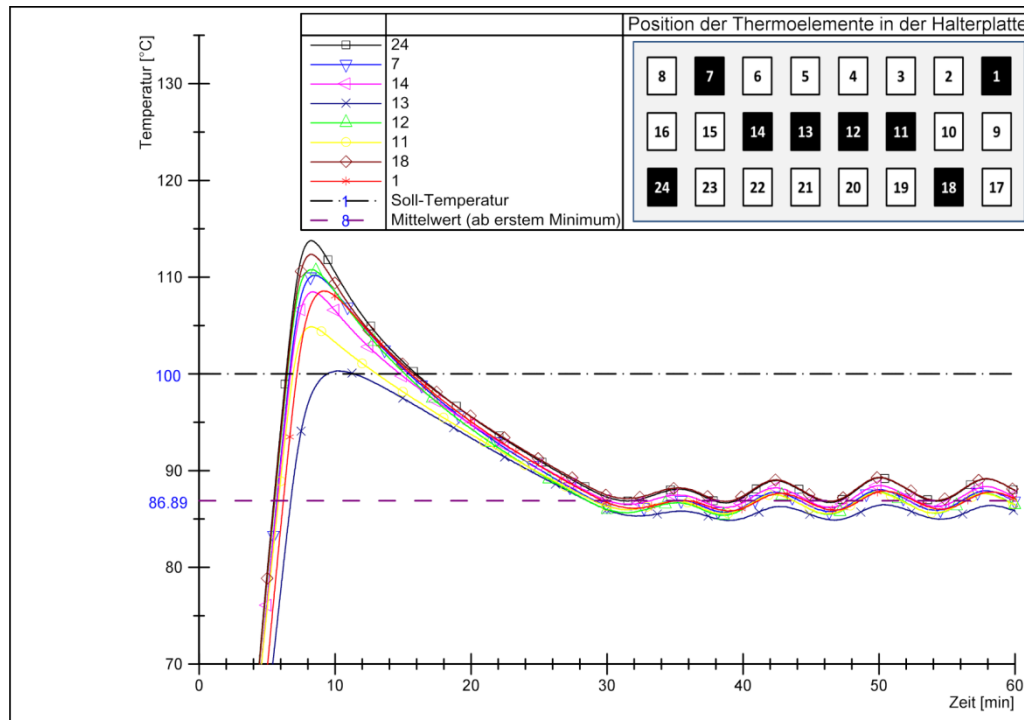


Abb. A10.15: Temperatur in der Halterplatte mit dem eingesetzten Messingprägwerkzeug beim Aufheizen der Prägeeinheit auf die Soll-Temperatur von 100 °C. Die Positionen der Thermoelemente in der Halterplatte entsprechen der in Abb. 5.7 (siehe Seite 67) dargestellten Nummerierung. Die Referenz-Temperatur $T_{Referenz}$ des Field-Point-Geräts liegt zwischen 25 °C und 27,9 °C.

Dies kann an der starken Vereinfachung des Modells der Prägeeinheit in der ANSYS-Simulation liegen. So kann der Unterschied zum realen Fall durch die Vernachlässigung weiterer Bestandteile der Prägeeinheit, der Strahlung, teilweise der Konvektion und des Kontaktwiderstands in den Zwischenschichten entstehen. Im Allgemeinen sind die simulierten Temperaturverläufe ähnlich der gemessenen (vergleiche Temperaturschwankung auf der Fläche der Halterplatte).

Entsprechend den ANSYS-Simulationsergebnissen liegen die Temperaturen auf der Oberfläche des Messingprägwerkzeuges in einem ähnlichen Bereich mit einem maximalen Unterschied von 0,5 °C, wie auf der Fläche der Halterplatte, und sind mit 3,5 °C-Schwankung verteilt.

A10.2 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde eine ANSYS-Simulation der Wärmeausbreitung in der Prägeeinheit durchgeführt. Das Ziel war, die Prätetemperaturen, die auf den Oberflächen der Prägwerkzeuge herrschen, zu simulieren und die in Abschnitt 5.2.3 gemachte Annahme zu überprüfen. Dafür wurde der Aufheizvorgang der Prägeeinheit mit dem Messingprägwerkzeug auf die Soll-Temperatur von 100 °C simuliert. Um diese ANSYS-Simulation zu erlauben, wurden vorher alle nötigen Randbedingungen, teilweise mittels Rechners, und teilweise durch die Messungen bestimmt.

Die ANSYS-Simulationsergebnisse zeigen eine Temperaturdifferenz von 69,4 % zu den gemessenen Temperaturwerten in Abschnitt 5.2.1. In diesem Fall besteht üblicherweise die Möglichkeit zur Optimierung sowohl der Simulation selbst als auch der Simulationsergebnisse. Diese wurde allerdings im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Trotz der Differenz zwischen den ANSYS-Simulationsergebnissen und den gemessenen Temperaturwerten in der Halterplatte können die Prägetemperaturen des Messingprägewerkzeuges nachvollzogen werden. Diese liegen nahe den Temperaturen, die in der Halterplatte gemessen wurden (siehe Abschnitt 5.2.1), womit auch die vorgenommene Annahme gerechtfertigt ist. Dies gilt ebenfalls für den Fall, dass das Stahlprägewerkzeug eingesetzt wird, da die gemessenen Temperaturen in der Halterplatte bei den beiden Prägewerkzeugen sich nach dem Aufheizen der Prägeeinheit und dem nachfolgenden Einpendeln nicht unterscheiden. Für die Einschätzung der Prägetemperaturen bei weiteren Soll-Temperaturen an der GEBA 6 können die Messergebnisse in Anhang 8 benutzt werden.

Anhang 11A. Linienstärkenzunahme: Prägefolie Luxor GTS Premium 355, Messingprägewerkzeug

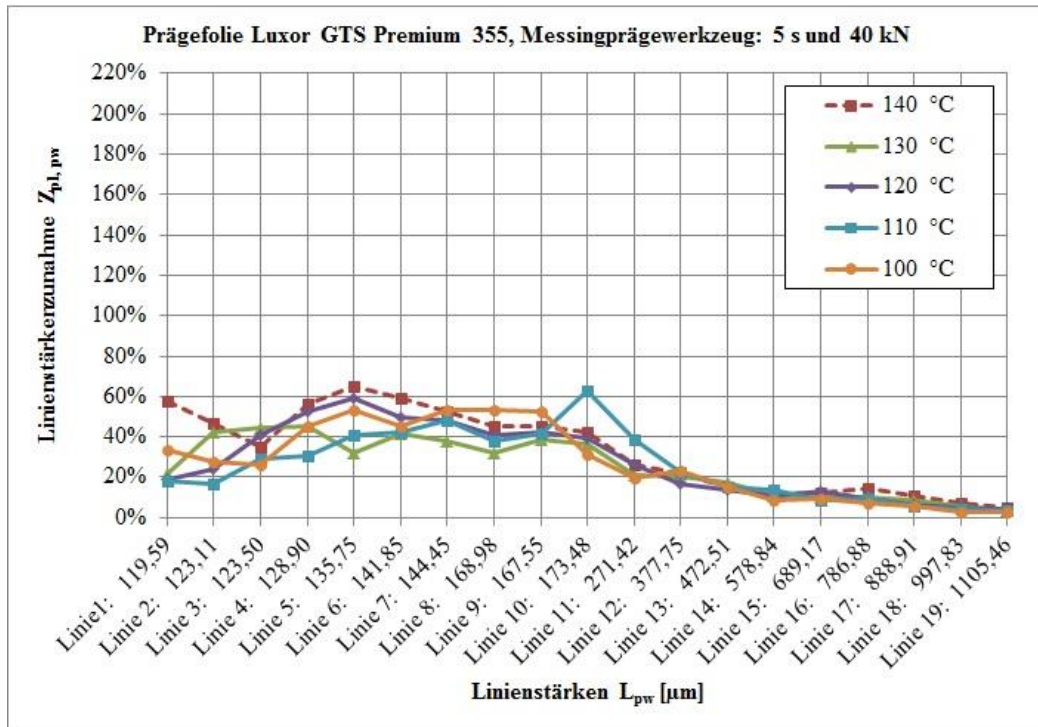


Abb. A11A.1: Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ (nach Gleichung 6.1 auf Seite 102) der geprägten Linien der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** in Bezug auf die gravierten Linien des **Messingprägewerkzeuges**. Soll-Temperatur: 100 °C, 110 °C, 120 °C, 130 °C, 140 °C; Prägezeit: 5 s; Anpressdruck: 40 kN.

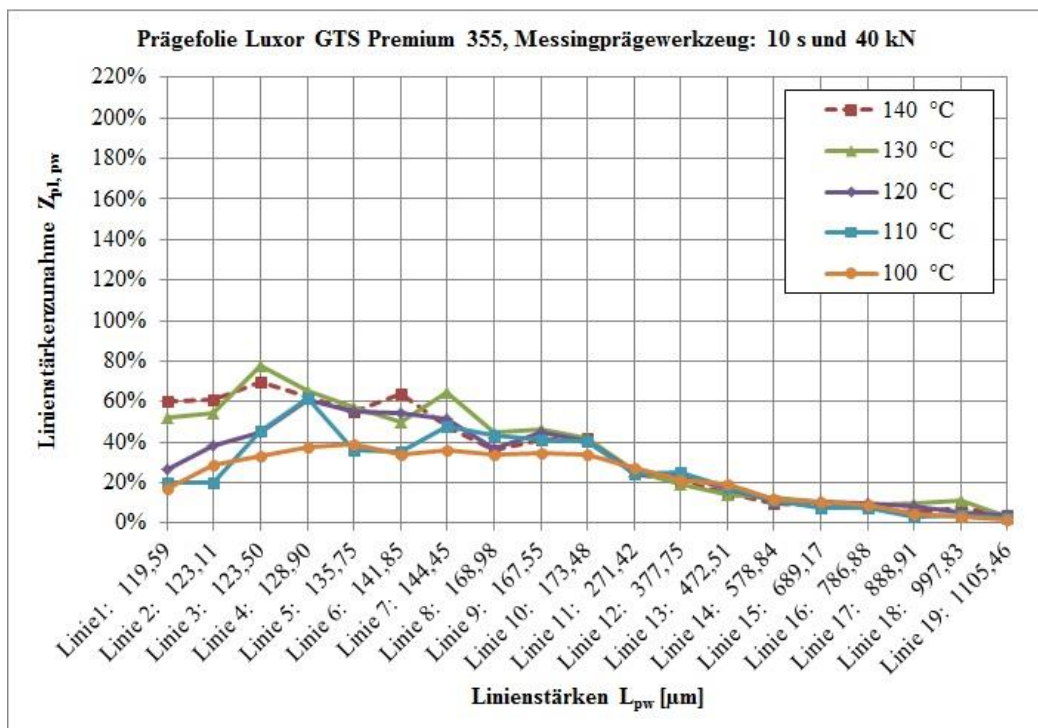


Abb. A11A.2: Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ (nach Gleichung 6.1 auf Seite 102) der geprägten Linien der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** in Bezug auf die gravierten Linien des **Messingprägewerkzeuges**. Soll-Temperatur: 100 °C, 110 °C, 120 °C, 130 °C, 140 °C; Prägezeit: 10 s; Anpressdruck: 40 kN.

Anhang 11B. Linienstärkenzunahme: Prägefolie Luxor GTS Premium 355, Stahlprägewerkzeug

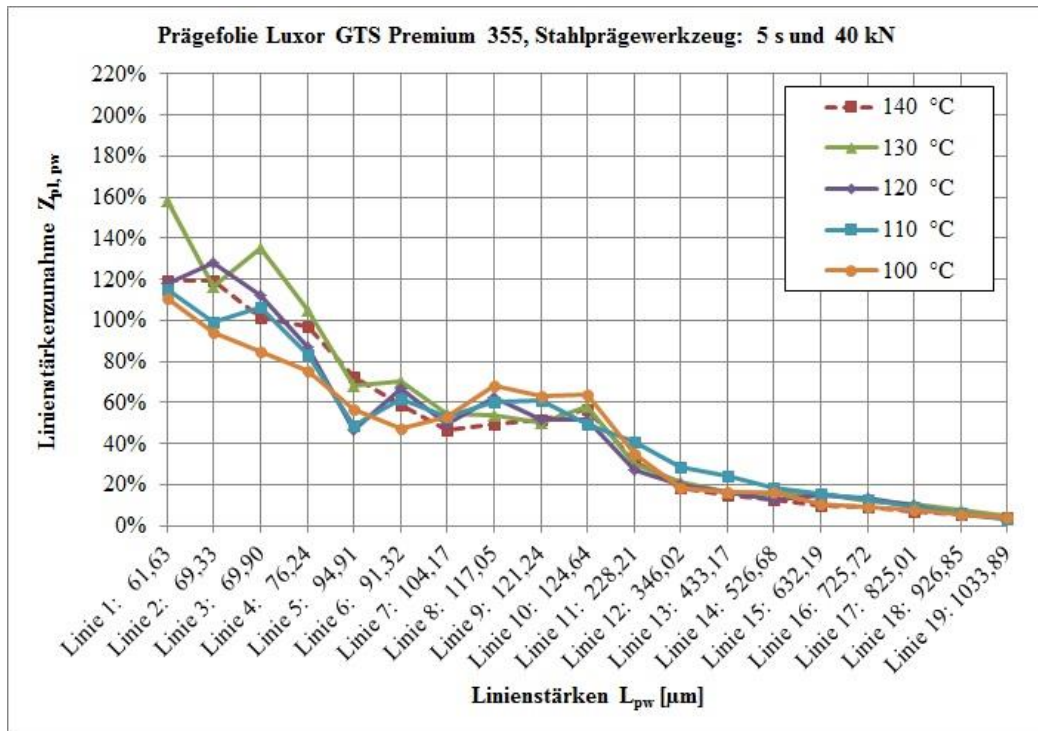


Abb. A11B.1: Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ (nach Gleichung 6.1 auf Seite 102) der geprägten Linien der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** in Bezug auf die gravierten Linien des **Stahlprägewerkzeuges**. Soll-Temperatur: 100 °C, 110 °C, 120 °C, 130 °C, 140 °C; Prägezeit: 5 s; Anpressdruck: 40 kN.

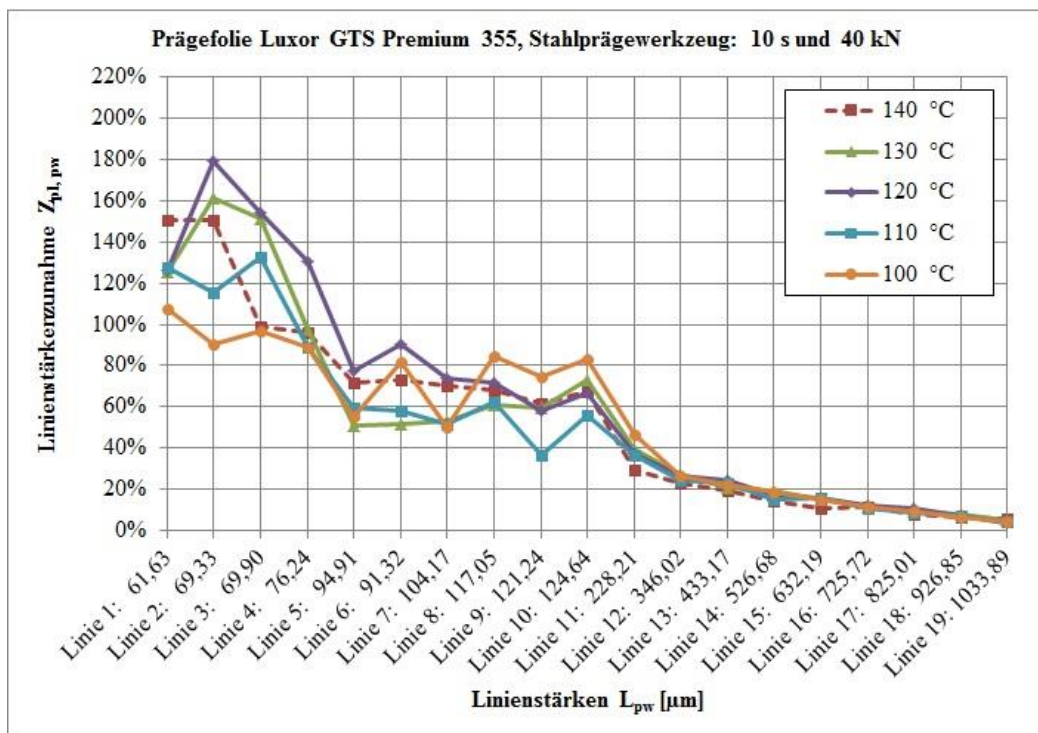


Abb. A11B.2: Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ (nach Gleichung 6.1 auf Seite 102) der geprägten Linien der Prägefolie **Luxor GTS Premium 355** in Bezug auf die gravierten Linien des **Stahlprägewerkzeuges**. Soll-Temperatur: 100 °C, 110 °C, 120 °C, 130 °C, 140 °C; Prägezeit: 10 s; Anpressdruck: 40 kN.

Anhang 11C. Linienstärkenzunahme: Prägefolie HS 19-3, Messingprägewerkzeug

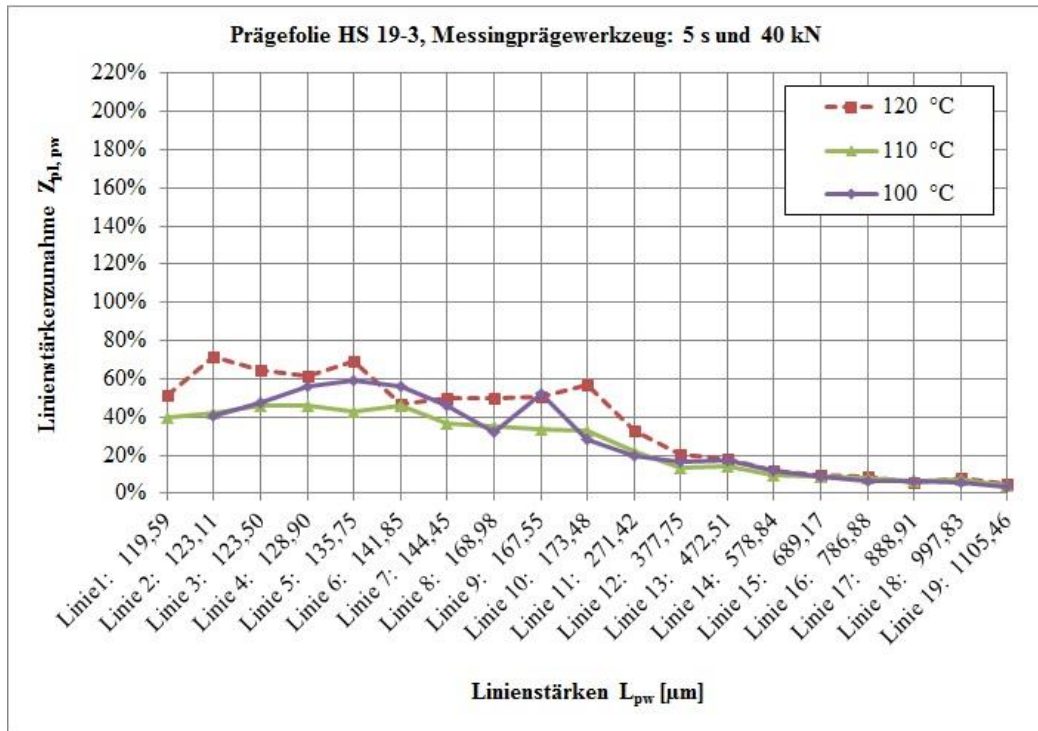


Abb. A11C.1: Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ (nach Gleichung 6.1 auf Seite 102) der geprägten Linien der Prägefolie **HS 19-3** in Bezug auf die gravierten Linien des **Messingprägewerkzeuges**. Soll-Temperatur: 100 °C, 110 °C, 120 °C; Prägezeit: 5 s; Anpressdruck: 40 kN.

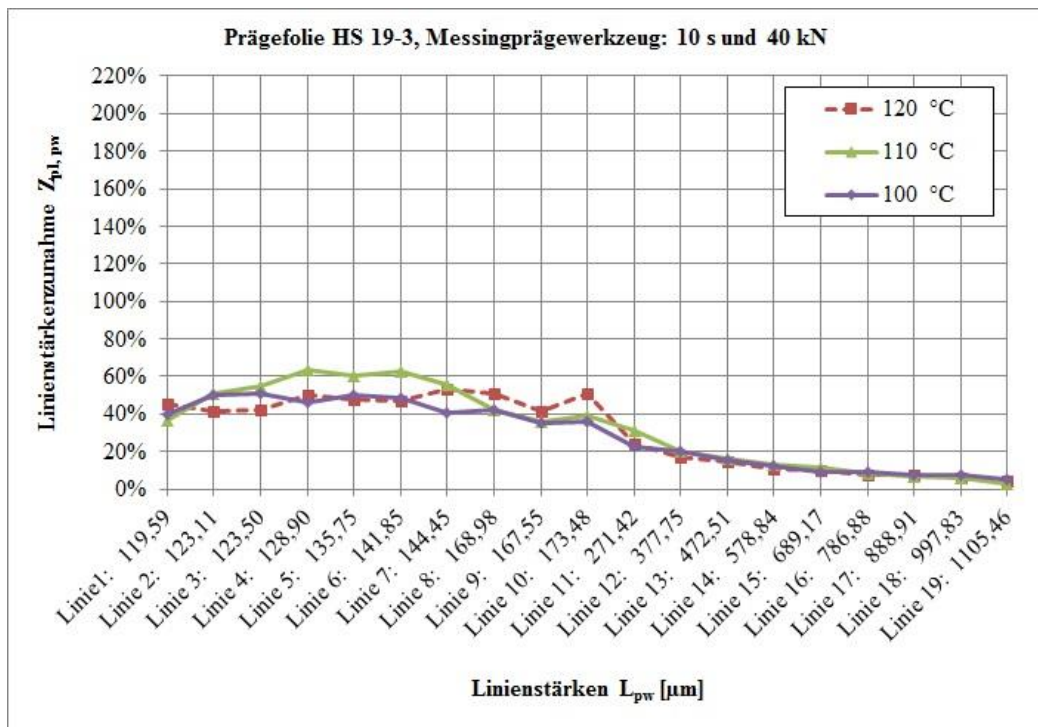


Abb. A11C.2: Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ (nach Gleichung 6.1 auf Seite 102) der geprägten Linien der Prägefolie **HS 19-3** in Bezug auf die gravierten Linien des **Messingprägewerkzeuges**. Soll-Temperatur: 100 °C, 110 °C, 120 °C; Prägezeit: 10 s; Anpressdruck: 40 kN.

Anhang 11D. Linienstärkenzunahme: Prägefolie HS 19-3, Stahlprägewerkzeug

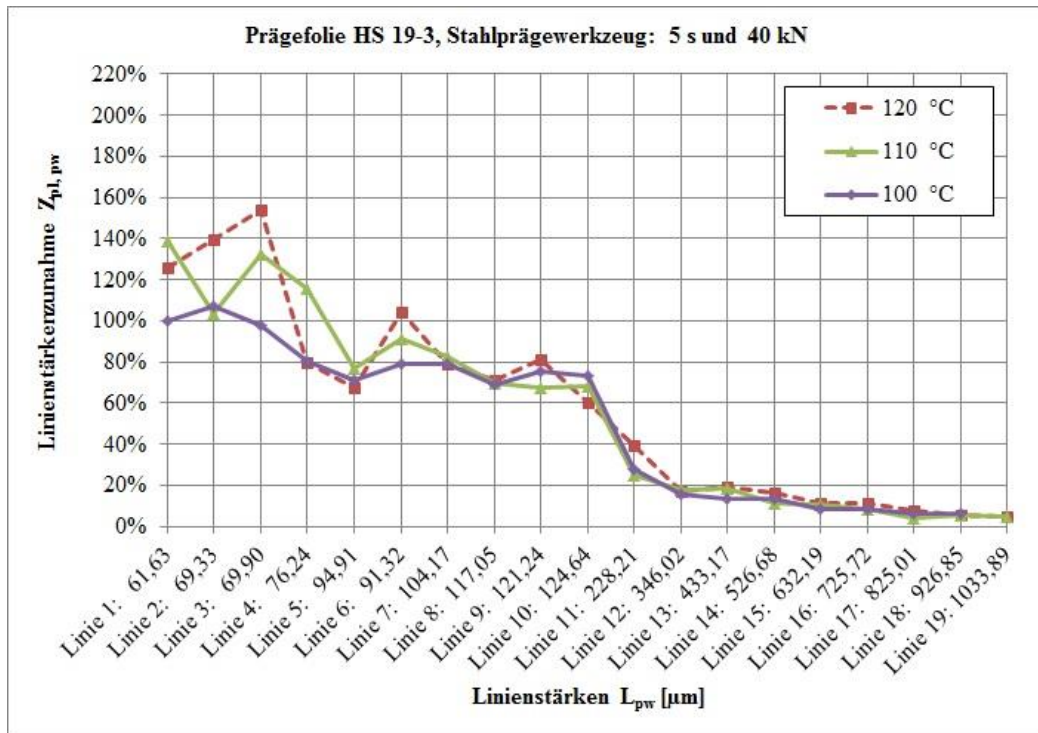


Abb. A11D.1: Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ (nach Gleichung 6.1 auf Seite 102) der geprägten Linien der Prägefolie **HS 19-3** in Bezug auf die gravierten Linien des **Stahlprägewerkzeuges**. Soll-Temperatur: 100 °C, 110 °C, 120 °C; Prägezeit: 5 s; Anpressdruck: 40 kN.

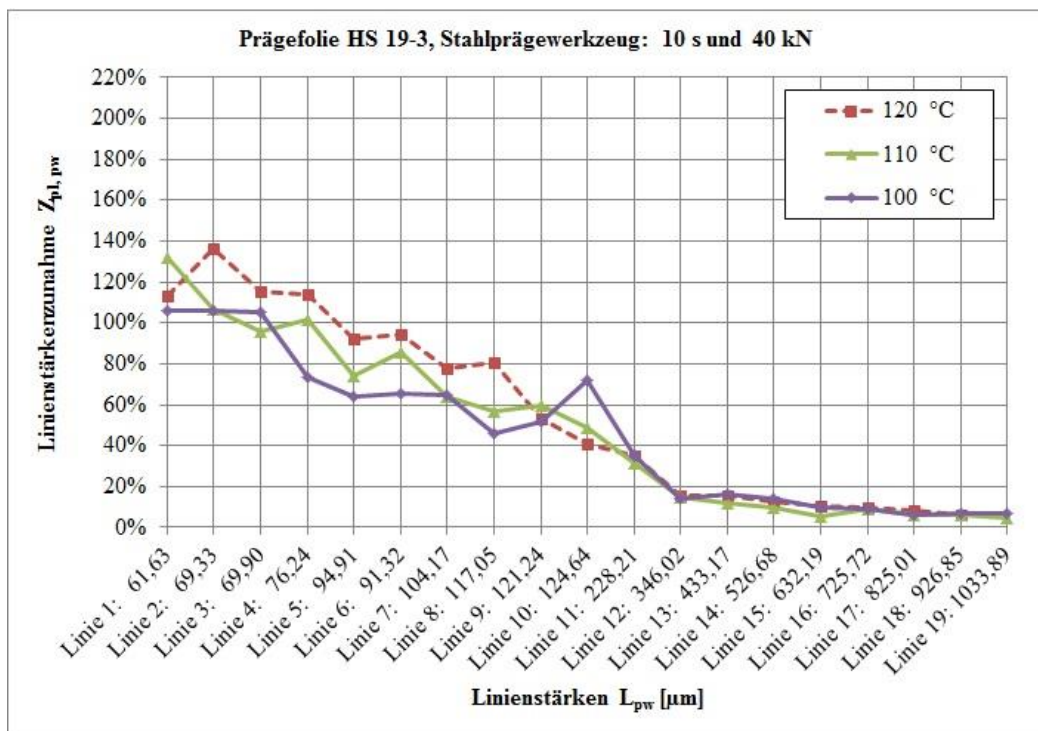


Abb. A11D.2: Linienstärkenzunahmen $Z_{pl,pw}$ (nach Gleichung 6.1 auf Seite 102) der geprägten Linien der Prägefolie **HS 19-3** in Bezug auf die gravierten Linien des **Stahlprägewerkzeuges**. Soll-Temperatur: 100 °C, 110 °C, 120 °C; Prägezeit: 10 s; Anpressdruck: 40 kN.

